EMILIO CHUVIECO

FUNDAMENTOS DE TELEDETECCIÓN ESPACIAL

Tercera edición revisada

EDICIONES RIALP, S.A.
MADRID

Portada: Altura media de la superficie marina generada a partir de datos del satélite ERS-1 (cortesía ESA, 1994).

Maquetación y fotomecánica:
HB&h, Dirección de Arte y Edición

Primera edición: septiembre 1990
Segunda edición: julio 1995
Tercera edición revisada: diciembre 1996

I.S.B.N.: 84-321-3127-X
Depósito Legal: M. 39.901-1996

Impreso en España — Printed in Spain

Anzos, S. L. - Fuenlabrada (Madrid)

ÍNDICE

A mis padres, José y Emilia

Prólogo a la Tercera Edición

Hace ahora seis años tuve la satisfacción de prologar el libro que, con el mismo título, el Profesor Chuvieco ponía en mis manos. No fue difícil, entonces, vaticinar lo que ha ocurrido: han sido muchos los estudiosos de las Ciencias de la Tierra que, de la mano del autor de estas páginas, se han acercado al conocimiento de una técnica que hoy resulta básica en la investigación territorial, como lo demuestra el hecho de que su enseñanza se incluya en diversas carreras universitarias.

Esta tercera edición tienen un doble valor. Por un lado, en este breve lapso de tiempo, el profesor Chuvieco ha acumulado una valiosa experiencia fruto del estudio y la docencia; por otro, su juventud imprime frescura a un texto que bien pudiera, en otros casos, adquirir la rigidez propia al perfil técnico del tema tratado. No resulta fácil casar esta doble condición. Madurez y juventud se dan la mano. Ello no se contempla en el libro como un alarde del autor, ni mucho menos como un ejercicio de prestidigitación. Más bien esa percepción, que indudablemente se tiene, se convierte en acicate y estímulo para el lector.

Quien se acerque a estas páginas no dude que encontrará plenamente actualizados y puestos al día todos los conocimientos relativos a la teledetección. Su estructura resulta lógica y hace fácil un camino que para los que comienza a recorrerlo pudiera parecer fatigoso y lleno de dificultades. En una primera parte se abordan unas nociones introductorias, siempre necesarias, los principios físicos de la teledetección, desembarazados en la medida de lo posible de la farragosidad habitual físico-matemática, y los sistemas especiales de teledetección. La segunda parte constituye el bloque esencial en la obra, presentando con detalle todo aquello relativo a la interpretación y explotación de los datos suministrados por los sensores a bordo de las plataformas espaciales; al tratamiento visual se añaden dos extensos capítulos dedicados al análisis digital donde el lector podrá encontrar una sistemática exposición de los últimos avances de esta técnica.

Las páginas de este libro enlazan plenamente con esa doble característica del quehacer científico actual: globalidad y multidisciplinariedad. En efecto, la

teledetección no es tan sólo una herramienta que nos permite auscultar con precisión y hasta descaro los mil detalles de una superficie terrestre; tampoco es el útil que desvele procesos inconexos, singulares o aislados; más bien, la teledetección contribuye a entender lo concreto desde la globalidad.

La multidisciplinariedad es, como acabamos de decir, una nota esencial que debe acompañar el intento por conocer la realidad; la teledetección es compartida por diversos especialistas que se preocupan por descifrar eso que ellos saben muy bien que no terminarán de conocer nunca; mas no por ello cejarán en su intento. En este sentido, la teledetección podría definirse como un ámbito común, compartido por científicos de diferente procedencia y hasta con intereses dispares. Docentes, investigadores, técnicos de ordenación territorial y hasta público en general miran nuestro mundo también con los ojos de los satélites artificiales; todos lo hacen con el noble empeño de aportar ideas que lo hagan más comprensible. Solo así utilizaremos sus recursos de manera razonable, respetaremos su patrimonio natural, cultural y, en suma, y amaremos como propio el entorno en el que vivimos.

Por último, quiero resaltar el excelente trabajo que en el departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá se está llevando a cabo. Este libro es una pieza más de ese edificio que pacientemente levantan cada día profesores y alumnos en un ambiente de excepcional calidad humana.

Madrid, Octubre de 1996

Prof. Dr. Rodolfo Núñez de las Cuevas
Presidente de la Real Sociedad Geográfica

Presentación a la Tercera Edición

"Las geografías, dijo el geógrafo, son los libros más preciosos de todos los libros. Nunca se pasan de moda. Es muy raro que una montaña cambie de lugar, o que un océano se vacíe de su agua. Nosotros escribimos de las cosas eternas."

Antoine de Saint-Exúpery, *El Principito*

Pese a que me siento bastante satisfecho de mi condición de geógrafo, he de reconocer humildemente que la primera edición de este libro no ha tenido la pervivencia que el autor del Principito auguraba a nuestras obras. Más aún, poco después de ser publicada, hace ahora seis años, ya mostraba múltiples aspectos revisables, bien por mi falta de pericia en manejar las fuentes disponibles, bien por los inevitables errores que acompañan a cualquier tarea de edición.

El desarrollo de la teledetección ha sido vertiginoso en los últimos años y el futuro inminente parece garantizar un crecimiento incluso más acelerado, si se confirman los múltiples proyectos de nuevos satélites que se encuentran en avanzado estudio. La ampliación de los países generadores de datos (más allá de Estados Unidos, Rusia, Francia, India o Japón), y la irrupción de los consorcios privados, hace prever un aumento exponencial de las imágenes disponibles sobre nuestro planeta. Con el notable avance en los sistemas de comunicación, almacenamiento y análisis digital, el principal cuello de botella que ahora parece vislumbrarse es la falta de científicos capaces de explotar íntegramente este gran volumen de datos. La base de la pirámide, que debe estar formada por expertos en las distintas ramas de aplicación de esta técnica, resulta todavía bastante estrecha, frente al aumento de los estratos superiores (aquellos que se encargan del diseño de los sistemas de observación y del segmento terrestre).

Esta edición revisada, al igual que la primera, pretende ser una modesta aportación hacia la expansión de esa base, pues está enfocado hacia los científicos

de orientación ambiental. Los nuevos planes de estudio ya consideran las técnicas de teledetección como parte integrante en la formación de aquellos alumnos que verterán hacia el territorio su preocupación más directa. La globalidad de los problemas ambientales requiere complementar la escala y la cobertura tradicional de los estudios de campo con nuevas herramientas, que permitan observar territorios más amplios y más frecuentemente.

Hemos mantenido el esquema general de la primera edición de esta obra, así como su tono asequible, restringiendo la formulación a los aspectos básicos, con objeto de facilitar el acceso al contenido, salvando al mismo tiempo el debido rigor científico. Se mantienen los capítulos incluidos en la primera edición, con la excepción de dividir el dedicado a la interpretación digital de imágenes en dos, el primero centrado a correcciones y realces, y el segundo en técnicas para generar información temática. En este último, se han introducido múltiples modificaciones respecto a la primera edición, con nuevos epígrafes sobre técnicas de detección de cambios y estudio de la estructura espacial del territorio. Se han ampliado también los dedicados a obtener variables biofísicas a partir de la imagen y se han introducido nuevos criterios de clasificación (redes neuronales, lógica borrosa). Se ha enriquecido el análisis de imágenes radar, aunque somos conscientes de que todavía resulta algo escaso a tenor de los avances más recientes. En el resto de los capítulos, hemos procurado poner al día lo más sustancial, aclarando algunos epígrafes que, en opinión de nuestros alumnos (verdaderos deudores de esta obra) merecían un cambio de enfoque.

La notación que incluye el texto también respeta los criterios de la primera edición. Las fórmulas se citan entre corchetes [ ] con dos números: el primero hace referencia al capítulo en donde se incluye y el segundo al orden dentro de ese capítulo. De forma similar se citan las figuras, entre paréntesis ( ) y precedidas de la indicación fig., también con dos números. Aquellas que aparecen con un asterisco * indican imágenes en color y están situadas en el encarte central del libro. Por último, en ocasiones se sugiere al lector acudir a otros capítulos para recabar información adicional. Esto se hará indicando la numeración de ese capítulo entre paréntesis ( ). Al final de la obra, se mantienen, aunque algo enriquecidos, los apéndices donde el lector podrá encontrar información adicional sobre esta técnica, un glosario de términos y un índice temático.

Al igual que en la primera edición, mi trabajo ha estado en todo momento apoyado por los comentarios y sugerencias de alumnos y compañeros de trabajo. Aunque citarlos a todos aumentaría excesivamente la obligada brevedad de este prefacio, resulta de justicia reseñar a quienes han dedicado generosamente su tiempo a revisar diversos borradores de esta obra. En mi propio departamento, estoy especialmente reconocido a las sugerencias de José Sancho Comíns, Francisco Javier Salas y Francisco Javier Martínez Vega. Además, he contado con el inestimable consejo de expertos de otras instituciones, como Vicente Caselles,

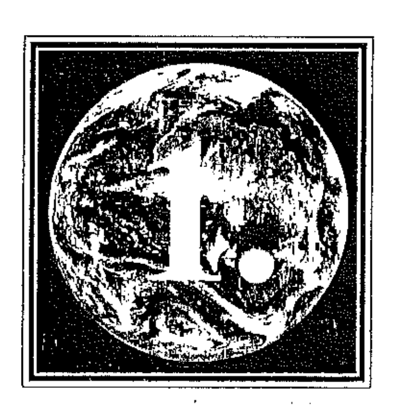
Amparo Gilabert, Manuel Cantón, Xavier Pons, Alfonso Careaga y José Antonio de Frutos. La ayuda de David Cocero ha sido muy valiosa para recopilar las referencias bibliográficas. En el aspecto gráfico, Eduardo de Miguel, del INTA, y la Agencia Espacial Europea me han facilitado material de gran interés. Finalmente, la estancia en *Clark University* fue crucial para actualizar la bibliografía disponible. A Michele Fulk y Ron Eastman les estoy especialmente agradecido por su acogida.

Mi propósito ha sido actualizar, aclarar y ampliar el material contenido en la primera edición de esta obra, manteniendo su tono didáctico. Si la finalidad de escribir esa primera edición fue facilitar la enseñanza de esta técnica, mi mayor alegría ha sido recibir comentarios, provenientes de distintos países de habla hispana, sobre su utilidad didáctica. Espero que esta tercera edición revisada siga contribuyendo a esa tarea de formación, no sólo porque la docencia es mi principal actividad, sino porque estoy convenido de que la educación es la piedra angular del desarrollo de los pueblos.

Alcalá de Henares, Julio de 1996

EMILIO CHUVIECO SALINERO

PARTE I:
La Obtención de la Imagen



Nociones Introductorias

"La humanidad debe elevarse por encima de la Tierra,
al techo de la atmósfera y más allá,
porque solamente eso nos permitirá
entender el mundo en que vivimos"

[Sócrates]

1.1. Definición y objetivos

Volar ha sido, desde épocas muy remotas, uno de los sueños más intensamente anhelados por la Humanidad. Pese a la persistencia del intento, sólo en fechas recientes se ha dispuesto de los medios técnicos necesarios para hacer realidad este deseo. Desde ese momento, el ritmo de la innovación tecnológica ha sido vertiginoso, lo que nos ha permitido enriquecer notablemente nuestro conocimiento sobre el Planeta y sus habitantes.

Uno de los principales acicates de esta aventura aérea ha sido la búsqueda de una nueva visión de los paisajes terrestres. El afán de remontar la limitada perspectiva de la visión humana es evidente ya desde los inicios de la aeronáutica, llegando a ser, hoy en día, una pieza clave de la investigación espacial.

Esa observación remota de la superficie terrestre constituye el marco de estudio de la teledetección. Este vocablo es una traducción latina del término inglés *remote sensing*, ideado a principios de los 60 para designar cualquier medio de observación remota, si bien se aplicó fundamentalmente a la fotografía aérea, principal sensor de aquel momento. En sentido amplio —y así se tratará en este libro—, la teledetección no engloba sólo los procesos que permiten obtener una imagen, sino también su posterior tratamiento, en el contexto de una determinada aplicación. En esta obra se restringe el análisis a aquellos medios de teledetección montados sobre plataformas espaciales, de ahí el adjetivo que completa el título. Queda relegada, por tanto, la fotografía aérea, la videografía o el radar aerotransportado, si bien resultan en muchos estudios un aliado imprescindible de los sensores espaciales. Se asume que el lector está familiarizado con las técnicas de foto-interpretación, ya que han venido siendo comunes en la mayor parte de las facultades con orientación medio ambiental. De esta forma, podremos centrarnos en los sistemas espaciales de teledetección, aún carentes de

suficiente bibliografía en nuestra lengua, en contraste con el gran interés que suscitan entre diversos expertos en ciencias de la Tierra: geógrafos, biólogos, edafólogos, forestales, agrónomos, oceanógrafos o cartógrafos, hacia quienes esta obra va dirigida.

Si hemos definido la teledetección espacial como aquella técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, estamos asumiendo que entre la Tierra y el sensor existe una interacción energética, ya sea por reflexión de la energía solar o de un haz energético artificial, ya por emisión propia. A su vez, es preciso que ese haz energético recibido por el sensor sea almacenado convenientemente, bien a bordo del satélite, bien en las estaciones receptoras, de cara a que pueda interpretarse para una determinada aplicación. Como antes comentamos, ese análisis de la información recibida se incluye también —en sentido amplio— dentro del estudio de la teledetección, aunque esté más allá de los procesos de adquisición propiamente dichos. No obstante, constituye un capítulo fundamental para nuestros intereses, por cuanto esta obra se dirige más a quienes explotan la información resultante que a quienes diseñan los sensores o las plataformas que los sustentan.

En definitiva, un sistema de teledetección espacial, tal y como se concibe en la presente obra, incluye los siguientes elementos (fig. 1.1):

(i) Fuente de energía, que supone el origen de la radiación electromagnética que detecta el sensor. Puede tratarse de un foco externo a éste, en cuyo caso se habla de teledetección pasiva, o de un haz energético emitido por el sensor (teledetección activa). La fuente de energía más importante, obviamente, es el sol.

(ii) Cubierta terrestre, formada por distintas masas de vegetación, suelos, agua o construcciones humanas, que reciben la señal energética procedente de (i), y la reflejan o emiten de acuerdo a sus características físicas.

(iii) Sistema sensor, compuesto por el sensor, propiamente dicho, y la plataforma que lo alberga. Tiene como misión captar la energía procedente de las cubiertas terrestres, codificarla y grabarla o enviarla directamente al sistema de recepción.

(iv) Sistema de recepción-comercialización, en donde se recibe la información transmitida por la plataforma, se graba en un formato apropiado, y, tras las oportunas correcciones, se distribuye a los interesados.

(v) Intérprete, que convierte esos datos en información temática de interés, ya sea visual o digitalmente, de cara a facilitar la evaluación del problema en estudio.

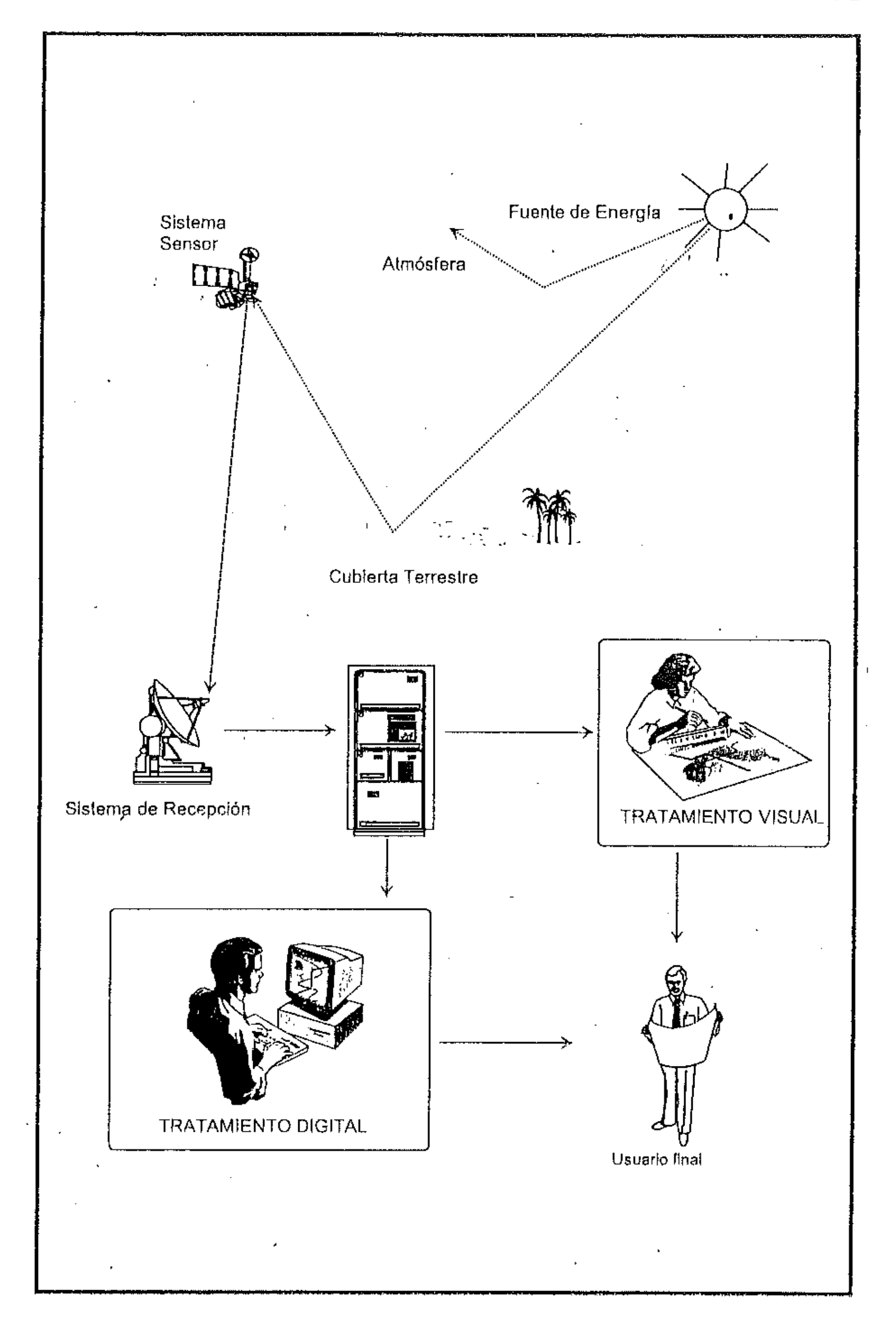


Fig. 1.1 - *Componentes de un sistema de teledetección*

(vi) Usuario final, encargado de analizar el documento fruto de la interpretación, así como de dictaminar sobre las consecuencias que de él se deriven.

El símil de la visión humana puede ayudar a entender el significado de estos componentes. El ojo humano (iii) recibe un haz energético procedente de los objetos exteriores (ii) por reflejo de la luz solar (i). Esa señal se transmite al cerebro (iv), que es capaz de formar una serie de imágenes sobre el mundo real que le circunda. El individuo que observa es a la vez intérprete (v) y usuario final (vi) de la imagen detectada, lo que le permite tomar decisiones sobre su propio comportamiento. En otras palabras, la visión humana forma un sistema de teledetección —muy sofisticado por cierto—, puesto que nos permite caracterizar con mucho detalle los objetos que observamos.

Sin embargo, nuestra percepción visual presenta también algunas limitaciones. Por un lado, se restringe por la sensibilidad espectral de nuestras células sensoras, que sólo nos permiten apreciar un determinado tipo de energía, denominado, por esa razón, espectro visible. Otras formas energéticas, como el calor, no son observables visualmente, por lo que parece conveniente contar con unos «ojos artificiales» que amplíen nuestras propias posibilidades. Por otro lado, el campo de visión humano está limitado por nuestra propia estatura, o a la que podemos adquirir desde observatorios naturales, por lo que cuenta con un pequeño radio de acción. Además, se trata de una perspectiva oblicua. Ambos factores dificultan observar fenómenos muy extendidos, como inundaciones o incendios, donde las estimaciones visuales pueden ser imprecisas. Para paliar estas limitaciones, se ha acudido a sensores artificiales, montados sobre plataformas situadas a una cierta altitud. Con ellos, se tiene acceso a tipos de energía no visibles (ultravioleta, infrarrojo, micro-ondas), y, además, desde una nueva perspectiva, vertical y panorámica. Esta nueva información expande notablemente nuestro conocimiento del medio que nos rodea, facilitando la interpretación de múltiples procesos que afectan al Planeta.

El creciente empleo de distintos sensores de observación terrestre está originando no sólo una enorme cantidad de información, sino también una nueva forma de estudiar la superficie terrestre. La teledetección, junto a las técnicas anejas de almacenamiento y proceso de la información geográfica, permiten disponer de una masa ingente de datos sobre el territorio, algunos de ellos accesibles en tiempo real. Para aprovechar con fruto estas técnicas, el recurso a los ordenadores electrónicos resulta casi inevitable. Una vez salvado el necesario entrenamiento, estos equipos amplían notablemente nuestra capacidad de análisis: ayudan a elaborar una interpretación rápida y económica del problema bajo estudio, a la vez que permiten abordar análisis integrados, difícilmente viables con otros medios tradicionales. En definitiva, y gracias a estos recursos, podemos cada día poner más el énfasis sobre el planteamiento de modelos y el análisis de resultados —tareas éstas donde la inteligencia humana resulta insustituible—,

librándola de otras labores mecánicas (acopio y ordenación de datos), que han consumido tradicionalmente las mejores fuerzas del investigador.

De acuerdo con el esquema antes enunciado, esta obra engloba el estudio de los distintos elementos que forman un sistema de teledetección. En primer lugar, se analizan los procesos que permiten obtener las imágenes espaciales: principios físicos de transmisión de la energía (cap. 2), y técnicas de adquisición de imágenes, con un breve repaso de los principales proyectos de observación terrestre (cap. 3). El resto de los capítulos se centran en la interpretación —tanto visual como digital— de las imágenes, punto crucial para los interesados en las aplicaciones de esta técnica (cap. 4 a 7). La verificación de los resultados obtenidos en esa fase se aborda en el capítulo 8, para concluir la obra con el 9, a modo de epílogo, dedicado al estudio de la conexión entre la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica, dentro de un planteamiento integrado del análisis medio ambiental. Estos capítulos se preceden de éste, que incluye unos comentarios sobre el pasado, presente y desarrollo previsible de la teledetección, incluyendo algunos aspectos legales que pueden ayudar a enmarcar conflictos internacionales derivados de esta observación terrestre.

1.2. Un poco de historia

La teledetección es una técnica aplicada, y como tal muy dependiente del estado de desarrollo tecnológico existente en cada momento. Por cuanto conjuga aspectos muy variados —óptica y detectores del sensor, vehículo que lo sustenta, sistemas de transmisión, equipos de tratamiento, etc.—, las formas de teledetección han variado ostensiblemente en las últimas décadas (fig. 1.2). El crecimiento ha sido realmente vertiginoso, facilitando una progresión muy notable, tanto en la cantidad, como en la variedad y calidad de la información disponible para campos científicos muy variados.

Las primeras experiencias de teledetección se remontan a 1859, cuando Gaspar Félix de Tournachon obtuvo las primeras fotografías aéreas desde un globo cautivo (Hyatt, 1988). Al año siguiente, James Wallace repitió la experiencia sobre la ciudad de Boston, poniéndose en evidencia el interés de la nueva perspectiva aérea para un conocimiento más detallado de la organización urbana.

En los años posteriores, se produjo un importante desarrollo de la observación fotográfica desde avión, gracias a los progresos realizados en ópticas y emulsiones. En 1909, Wilbur Wright adquirió la primera fotografía aérea, abriendo el camino a una larga historia de observación desde plataformas remotas. La primera cámara aérea propiamente dicha se desarrolló durante la I Guerra Mundial, concretamente en 1915, por J.T.C.Moore-Brabazon. La importancia estratégica

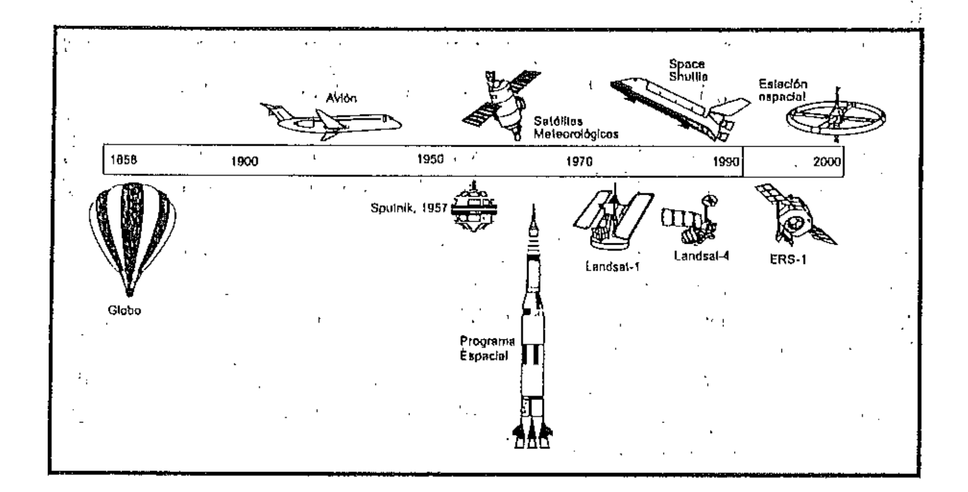


Fig. 1.2 - *Evolución histórica de los sistemas de teledetección*

de este escrutinio quedó pronto en evidencia, desarrollándose notablemente las técnicas de adquisición y procesado fotográfico (Brookes, 1975).

El segundo conflicto bélico implicó un notable desarrollo de las técnicas de teledetección aérea. El progreso se orientó a mejorar la óptica de las cámaras de reconocimiento, así como las emulsiones utilizadas (de esta época proceden las primeras películas en infrarrojo, desarrolladas por *Kodak Research Laboratories*). Asimismo, se introdujeron nuevos sensores, como el radar, y se mejoraron los sistemas de comunicación. Por otro lado, la aeronáutica prosperó notablemente, lo que aseguró mayor estabilidad a las plataformas de observación.

Todas estas innovaciones se aplicaron posteriormente para usos civiles, desarrollándose las primeras aplicaciones de esta exploración aérea para el conocimiento y control de los recursos naturales. En los años de posguerra se perfeccionaron los sistemas radar, introduciéndose el radar lateral aerotransportado (SLAR), y se pusieron a punto los sensores térmicos de barrido.

A finales de los años 50, el desarrollo de los sistemas de navegación permitió concebir los primeros ingenios espaciales. La denominada «guerra fría» dirigió hacia el espacio uno de sus objetivos preferentes, alentándose, desde uno y otro bando, una intensa investigación en estos temas. Al lanzamiento del satélite soviético Sputnik, en 1957, le siguen una larga serie de misiones civiles y militares, que han permitido no sólo la exploración de nuestro Planeta, sino también de la Luna y los planetas vecinos.

Poco después de iniciarse esta «carrera espacial», se puso en evidencia el interés de usar estas plataformas para adquirir valiosos datos de la superficie y

atmósfera terrestre. En 1960, la NASA lanzó el primer satélite de la serie TIROS, pionero de múltiples misiones de observación meteorológica, que han permitido un conocimiento y control más ajustados de las condiciones atmosféricas, evitando, o paliando al menos, graves catástrofes naturales.

Junto a estos satélites artificiales, en los años sesenta también se impulsaron misiones tripuladas, dedicadas a la exploración del Sistema Solar y la conquista de la Luna. Además de estos fines, aportaron asimismo valiosas imágenes sobre la superficie terrestre, que sirvieron de acicate para planear proyectos dedicados exclusivamente a esta finalidad. Las primeras fotografías espaciales se tomaron por Alan B. Shepard, de forma espontánea y un tanto rudimentaria, durante una de las misiones del Mercury (1961). En los años siguientes se continuaron tomando fotografías desde naves tripuladas, aunque fue la misión Gemini-Titán (1965) la que incluyó los primeros experimentos formales de fotografía espacial, en este caso para usos geológicos y meteorológicos (experimentos S005 y S006, respectivamente).

Alentada por los brillantes resultados de estos ensayos, la NASA continuó proyectando este tipo de observaciones. Durante los vuelos del Apollo-6 y Apollo-7 se adquirieron diversas series de fotografías verticales, mientras en el del Apollo-9 (1969) se abordó el primer experimento multi-espectral, denominado S065, compuesto por cuatro cámaras Hasselblad con distintos filtros.

Todas estas experiencias, junto al bagaje aportado por los satélites meteorológicos, hicieron concebir a la NASA proyectos dedicados exclusivamente a la cartografía y evaluación de los recursos naturales. El 23 de julio de 1972 supuso la culminación de esta tendencia, con el feliz lanzamiento del primer satélite de la serie ERTS (*Earth Resources Technollogy Satellite*). Este proyecto, bautizado Landsat con la puesta en órbita del segundo satélite en 1975, resulta el más fructífero hasta el momento para aplicaciones civiles de la teledetección (3.5.1). A partir de la serie Landsat, el interés de la comunidad científica internacional por esta técnica ha crecido exponencialmente, contándose por miles los estudios desarrollados —en muy variados países del mundo— sobre las imágenes proporcionadas por estos satélites (fig. 1.3).

A la serie Landsat siguieron otros proyectos específicamente diseñados para la observación medio ambiental. Los más conocidos son el laboratorio espacial tripulado Skylab (1973), el satélite oceanográfico Seasat (1978), el de investigación térmica HCMM (1978) —todos ellos propiedad de NASA—, el satélite francés SPOT (1986), el japonés MOS-1 (1987), el indio IRS-1 (1988), y los rusos Soyuz y Salut. En los últimos años, las misiones de teledetección se han incrementado exponencialmente, como veremos más tarde (cap. 3.5). La Agencia Espacial Europea y la canadiense ya han lanzado sus propios satélites al espacio, y pronto lo harán la brasileña, en colaboración con la china, y varios consorcios



Fig. 1.3 - *Imágenes multitemporales adquiridas por el satélite Landsat el 4 de julio de 1988 (izquierda) y 18 de julio de 1993 (derecha). Se observa el área afectada por las severas inundaciones del río Mississippi, en las proximidades de la ciudad de San Louis (cortesía EOSAT).*

privados. La nueva situación política mundial favorece las mejoras en el detalle espacial proporcionado por los satélites de usos civiles, al levantarse algunas restricciones impuestas por los servicios de defensa. El creciente interés hacia los estudios de cambio climático global permite asegurar la financiación de algunos proyectos muy ambiciosos de teledetección, como es el caso de la plataforma polar, prevista para fines de siglo, que incluirá numerosos instrumentos para la observación de la Tierra.

1.3. Desarrollo actual

Pese a la juventud de esta tecnología, son ya numerosos los centros de producción, enseñanza e investigación que trabajan activamente en este campo. Las tendencias presentes parecen confirmar un creciente desarrollo de su aplicación, tanto en países desarrollados como en aquéllos con una situación tecnológica más deficiente.

De acuerdo con Curran (1985), podemos distinguir cuatro estadios en el desarrollo de cualquier disciplina. El primero vendría dado por un período preliminar de crecimiento, con una tradición investigadora escasa, y pocas o ninguna asociación dedicada a su estudio. El segundo, corresponde a un período de crecimiento exponencial, doblándose el número de publicaciones a intervalos regulares, a la vez que se establecen unidades de investigación. En el tercer nivel, el índice de crecimiento comienza a declinar y, aunque no existan importantes aumentos en el volumen de especialistas, el nivel de especialización y controversia aumenta. El último período se caracteriza por un nivel de crecimiento cercano a cero: las unidades de especialización y sociedades profesionales se consolidan y la ciencia adquiere madurez.

Dentro de este esquema, la teledetección ocupa estadios muy diversos según los países. «La mayor parte de los países en desarrollo se encuentran en el primer nivel, la mayor parte de los países europeos en el segundo, y Estados Unidos comienza a entrar en el tercer estadio» (Curran, 1985, p. 7).

Parece razonable pensar que nuestro país seguirá esta misma trayectoria, por lo que el análisis de la situación en Estados Unidos puede arrojar luces sobre las tendencias futuras[1]. De acuerdo a un informe sobre la privatización del proyecto Landsat remitido al Congreso de Estados Unidos (OTA, 1984), a principios de los 80 existían en ese país más de 50 organizaciones comerciales dedicadas al empleo de la teledetección espacial. En más de 18 Estados se utilizaban datos Landsat para la construcción de sus sistemas de información territorial, y sólo en 2 no se habían constatado estudios realizados a partir de imágenes de este satélite. Con datos de 1977, este mismo informe registraba 590 profesores e investigadores universitarios trabajando en teledetección. En ese mismo año se ofrecían 137 cursos sobre esta técnica en universidades americanas, con un total de 2.906 inscritos. A finales de los 80, se contabilizaban 549 cursos ofrecidos en teledetección por más de 300 departamentos de 125 universidades (Kiefer, 1989)[2]. Entre 1964 y 1984 se desarrollaron un total de 359 tesis doctorales sobre la materia, lo que da idea del importante desarrollo de la investigación en esta línea (Merideth y Sacks, 1986).

En cuanto a actividades profesionales, la mayor parte de las iniciativas se canalizan a través de la *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, que cuenta en 1996 con unos 7.000 afiliados y 155 empresas y socios institucionales. Entre los socios, un 30 % pertenecen al sector privado, lo que da idea de la actividad comercial en este campo. Esta asociación publica mensualmente la revista *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, una de las más prestigiosas de teledetección. Otras instituciones de gran actividad son los diversos

[1] Una información más completa sobre las actividades de teledetección en distintos países puede obtenerse en: Carter (1986) y Hyatt (1988). Una relación de algunas entidades citadas en este epígrafe puede consultarse en el apéndice 1.

[2] Jensen y Dahlberg (1983) cifraban en 691 los cursos de teledetección ofrecidos en universidades americanas, incluyendo los relativos a fotografía aérea, más del 80 % de los cuales se dictaban en universidades públicas. Los departamentos más activos, en esta docencia, eran los de Geografía (36 %), Geología (14,8 %) e Ingeniería Civil (8 %).

centros NASA (especialmente *Goddard*, en Maryland, y *Ames Research Center* y *Jet Propulsion Laboratory*, en California). Entre los departamentos universitarios, cuenta con gran tradición el *Environmental Research Institute* de Michigan (ERIM), el *Laboratory for Applications of Remote Sensing* (LARS) de la Universidad de Purdue (Indiana); el *Institute for Environmental Studies* de la Universidad de Wisconsin-Madison, y la *Remote Sensing Unit* de la Universidad de California en Santa Barbara, por citar sólo los más significativos. Desde el punto de vista comercial, la empresa EOSAT continúa encargándose de la distribución de los productos Landsat, con apoyo de algunos centros gubernamentales, como el *EROS Data Center*, NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) y NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) para mantener la red de estaciones receptoras.

En Canadá la situación también es muy favorable, contando con una institución nacional, el *Canada Center for Remote Sensing*, que cuenta con diversos centros regionales y coordina la actividad docente e investigadora en teledetección. También en este país ejerce su actividad una sociedad profesional, la *Canadian Remote Sensing Society*, dedicada a la organización de congresos periódicos y la publicación de una interesante revista, *Canadian Journal of Remote Sensing*. El reciente lanzamiento del satélite Radarsat contribuirá al afianzamiento industrial de esta técnica.

En el contexto europeo, tal vez el Reino Unido ha sido el país más interesado hasta el momento por la investigación aplicada en esta técnica. A principios de los 80, podían citarse hasta cincuenta instituciones que trabajaban activamente sobre ella (Bullard y Dixon, 1985), con una producción bibliográfica muy significativa: varios manuales universitarios, diversas publicaciones científicas (*International Journal of Remote Sensing*, *NRSC Newsletter*), y una sociedad, la *Remote Sensing Society*, muy activa en tareas de enseñanza y difusión. Esta asociación organiza anualmente, desde 1974, un congreso en distintas universidades inglesas. El *National Remote Sensing Center*, es la institución líder en el fomento y desarrollo de la investigación (Carter, 1986).

Las autoridades francesas han realizado un gran esfuerzo en este campo, que llevó al lanzamiento del primer satélite SPOT, en 1986, continuado por otros dos satélites de la misma serie en 1990 y 1993 (3.5.2). El proyecto fue desarrollado por el *Centre National d'Etudes Spatiales* (CNES), con una pequeña colaboración de la *Swedish Space Corporation*. La explotación comercial de las imágenes adquiridas por este satélite se encarga a una empresa privada, *SPOT Image*, que cuenta con distribuidores en todo el mundo. En el terreno de las aplicaciones, el *Groupement pour le Développement de la Télédétection Aérospatiale* (GDTA), con sede en Toulousse, ha realizado numerosos cursos de entrenamiento y ciclos de formación, coordinando a distintas instituciones gubernamentales con interés en teledetección. La producción científica no es aún tan sustancial como

en el caso de Estados Unidos o el Reino Unido, si bien está creciendo notablemente en los últimos años.

Otros países europeos han mostrado gran interés en la aplicación de esta técnica para un mejor conocimiento de sus problemas medio ambientales. En los Países Bajos, la actividad docente e investigadora del *Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences* (ITC), con sede en Enschede, ha sido muy destacada, tanto en el campo de la docencia como de la investigación (*ITC Journal*). En Alemania, Bélgica, Italia y los países escandinavos existen numerosos centros dedicados a este tipo de investigaciones. Aunque en los países del Este europeo, la situación todavía es precaria, se están dando pasos hacia una mayor presencia de esta técnica, especialmente en los programas agrícolas y medioambientales (Voute, 1994).

La Unión Europea (UE), como conjunto, pretende impulsar las aplicaciones de la teledetección, mediante una mayor colaboración con la Agencia Espacial Europea (ESA), que ya ha lanzado varios satélites Meteosat y dos de recursos naturales (ERS-1 y ERS-2, en 1991 y 1995, respectivamente). La colaboración entre la UE y la ESA se basa en introducir el análisis de las imágenes en diversas direcciones generales de la Comisión. Las más activas hasta el momento han sido las dedicadas a Medioambiente y Agricultura. La primera ha promovido la realización del programa *CORINE* para obtener diversas variables de interés ambiental en el conjunto de los países miembros. De entre ellos, el dedicado a la cobertura del suelo (*CORINE-Land Cover*), se ha desarrollado a partir de imágenes de satélite. En cuanto a la Dirección General de Agricultura los programas más consolidados son el inventario de cultivos y la predicción de cosechas. Además, se están realizando trabajos de inventario forestal y de pastizales, así como estudios regionales sobre áreas menos favorecidas. La mayor parte de estas iniciativas parten del *Space Applications Institute* (SAI, previamente denominado *Institute for Remote Sensing Applications*) que se encuadra en el centro común de investigación de la Unión Europea en Ispra, para desarrollar distintas aplicaciones de la teledetección. La sola existencia de este instituto, demuestra el interés de la Europa Comunitaria para impulsar las aportaciones que esta tecnología puede brindar a los estados miembros. En cuanto a sociedades profesionales, en el ámbito europeo conviene citar la actividad de la Asociación Europea de Laboratorios de Teledetección (*European Association of Remote Sensing Laboratories*, EARSeL), que cuenta con casi 300 miembros (todos ellos departamentos universitarios o centros de investigación). Organiza congresos anuales y talleres técnicos, publica un boletín de noticias (*EARSeL Newsletter*) y una revista científica basada en los artículos presentados a los distintos talleres (*EARSeL Advances in Remote Sensing*).

El volumen de negocio del mercado europeo de la teledetección se ha cifrado, en un reciente estudio del SAI (SAI, 1995) en unos 173 millones de ECUS (unos 28.500 millones de pesetas), afectando a unas 350 organizaciones, con 9.500

empleados (en el estudio no se incluían las industrias dedicadas al desarrollo de los sensores o de las estaciones receptoras). En la mayor parte de los estados son las entidades de la Administración los principales clientes de esta técnica (un 65 %), frente a un 29 % del sector privado y un 6 % de entidades científicas. Las aplicaciones más demandadas son la cartografía y planeamiento (38%), agricultura (25%), sector forestal (13%) y militar (11%).

Por no ampliar excesivamente esta relación, podemos concluir citando otros países en donde la teledetección espacial resulta una técnica de notable implantación. Este es el caso de Japón, Brasil y la India, empeñados en el desarrollo de proyectos espaciales propios, así como de Rusia, con una larga trayectoria en esta disciplina, aunque poco conocida para los países occidentales. Las principales organizaciones son la *National Remote Sensing Agency*, localizada en Hyderabad (India); el *Remote Sensing Technology Center* (RESTEC), situada en Tokio, y el *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais* (INPE), emplazado en São Jose dos Campos (Brasil).

Tras repasar el contexto internacional, resulta conveniente detenernos sobre el estado de la teledetección en nuestro país. En ésta, como en otras tecnologías de punta, el desarrollo es desgraciadamente escaso y lento, pese a que algunos de nuestros investigadores realizaran estudios pioneros en esta línea, ya a mediados de los años setenta (Núñez, 1976). En el momento presente, existe un gran interés en la comunidad científica, pero aún no se ha consolidado como una técnica suficientemente difundida. Aunque ha crecido el número y la actividad de los grupos interesados en esta técnica, no se observa todavía un cuerpo científico consolidado, y aún resulta una herramienta poco utilizada. Parte de la responsabilidad puede basarse en la exigua presencia de la teledetección en los planes de estudio universitarios, y la escasa oferta de programas de especialización (Martín et al., 1992), especialmente si lo comparamos con nuestro contexto europeo (Vaughan, 1994). La tendencia futura mejorará esta situación, ya que los nuevos planes de estudio universitarios contemplan la inclusión de esta técnica. Al menos las licenciaturas de Geografía, Ciencias Ambientales, Geología, Ingeniería Forestal, Agrícola, Geodésica y Cartografía, incluyen la teledetección como asignatura de apoyo.

Un paso esperanzador hacia la consolidación de esta técnica en nuestro país, representa la puesta en marcha de la Asociación Española de Teledetección, creada en 1989 tras cuatro años de actividades como grupo de trabajo. Entre sus logros cuenta la organización de seis congresos nacionales (Barcelona, Valencia, Madrid, Sevilla, Las Palmas y Valladolid), y la publicación de una revista científica (la Revista Española de Teledetección) y un boletín informativo. Lamentablemente, aún el número de afiliados es escaso. Otra asociación interesada en esta técnica es la Sociedad Española de Cartografía, Fotogrametría y Teledetección, organizadora de cursos y seminarios sobre estas técnicas.

Tal vez una de las principales rémoras para impulsar el desarrollo de la teledetección en España, sea la inexistencia de un centro nacional, similar al NRSC inglés o al GDTA francés, que coordine los esfuerzos individuales y ponga en contacto a expertos, empresas y usuarios finales del producto. Los centros más destacados, sin pretender ser exhaustivo, son los dedicados a la producción cartográfica (Instituto Geográfico Nacional, Institut Cartogràfic de Catalunya, Agencia de Medioambiente de Andalucía), a la investigación (Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, Instituto Tecnológico y Geominero, Instituto de Economía y Geografía Aplicada, Instituto de Geología Jaume Almera), o a la docencia universitaria (Universidad de Alcalá, Granada, las Palmas, Santiago, Valencia y Valladolid). Existe un pequeño número de empresas dedicadas exclusivamente a esta temática (Infocarto, Ibersat) y otras que cuenta con departamentos de teledetección (Espelsa, Tragsatec, Inisel), pero aún resulta muy modesta la actividad comercial en nuestro país, siendo además muy dependiente del sector público.

1.4. Aspectos legales de la teledetección

La teledetección, como ya hemos indicado, supone la observación exterior de la superficie terrestre. El satélite, como es obvio, no ajusta su órbita a las fronteras nacionales, sino que adquiere imágenes de todo el globo. Esta adquisición de datos sobre un territorio soberano puede implicar una violación de su espacio aéreo, además de poner en evidencia recursos de un país que podrían ser explotados abusivamente por terceros. Por esta razón, se ha puesto de manifiesto la necesidad de regular jurídicamente las actividades de teledetección espacial.

El Comité de Naciones Unidas para el Uso Pacífico del Espacio Exterior ha intentado desarrollar unos principios legales que salven las tensiones entre Estados observados y observadores. El inicio de este proceso se encuentra en el tratado sobre las actividades de exploración del espacio, firmado en 1967. Allí se señalaba que «...el espacio exterior, incluso la Luna y otros cuerpos celestes, no podrá ser objeto de apropiación internacional por reivindicación de soberanía, uso u ocupación, ni mediante ningún otro medio» (*Treaty on principles goberning the activities of States in the exploration and use of outer space, including the Moon and celestial bodies*, art. II).

Este acuerdo constituye el eje sobre el que se ha venido apoyando el derecho espacial en los últimos años. Sus principales definiciones consagran un doble principio: libertad de exploración y uso del espacio exterior, y empleo en provecho común, sin posibilidad de apropiación por ningún estado. En definitiva, se define el espacio exterior como un patrimonio común de la Humanidad, no sujeto a intereses nacionales.

En el congreso UNISPACE'82, celebrado en Viena, se expresó el deseo de algunos países en desarrollo por controlar la distribución de las imágenes obtenidas sobre su territorio. Además, se convino en facilitar el acceso inmediato y no restrictivo a la información detectada sobre el territorio perteneciente a cada estado, así como en solicitar la previa autorización de éste para difundir dicha información a terceros países (OTA, 1984).

Las posturas en los últimos años han sido muy variadas. Algunos países de Iberoamérica, como Brasil y Argentina, abogaban porque el estado propietario de la plataforma pidiera permiso al estado detectado para tomar la información, y porque, en ningún caso, ésta se suministrara a terceros países. La Unión Soviética y Francia no estaban de acuerdo con el previo permiso, pero sí con proporcionar la información al estado detectado y no a terceros países. En el mismo sentido, Rusia y la India, proponían que se limitara a 50 m la resolución máxima de los sensores espaciales, con objeto de mantener las normas de seguridad militar. Estados Unidos, Reino Unido y Japón, se mostraban partidarios de que no existieran limitaciones en la observación y distribución de los datos.

Para reconciliar estas posturas, la Comisión de Naciones Unidas para el Uso Pacífico del Espacio Exterior creó un grupo de trabajo que estudiara los problemas derivados de la teledetección espacial. Tras numerosas discusiones, este Grupo presentó en 1986 un proyecto de principios, que fue finalmente aprobado por la Asamblea General de la ONU en diciembre de 1986. Las grandes directrices de esta legislación pueden resumirse en los siguientes puntos (Tapia, 1989):

(i) la teledetección se realizará en provecho e interés de todos los países, de acuerdo con el derecho internacional;

(ii) se respetará el principio de soberanía plena y permanente de los Estados sobre su propia riqueza y recursos naturales, sin perjudicar los legítimos derechos e intereses del Estado observado;

(iii) se promoverá la cooperación internacional sobre recepción, interpretación y archivo de datos, prestándose asistencia técnica;

(iv) deberán los Estados informar al Secretario General de las Naciones Unidas de los programas de teledetección que se propongan desarrollar, así como a los Estados interesados que lo soliciten;

(v) se informará a los Estados afectados para prevenir fenómenos perjudiciales para su medio ambiente, y contarán con acceso sin discriminación, y a un coste razonable, de los datos obtenidos sobre su territorio.

Estas líneas parecen marcar la evolución reciente del derecho espacial en lo que afecta a actividades de teledetección. La amplitud de estas actividades a otros países más allá de Estados Unidos y la Unión Soviética (caso de Japón, Canadá, India o Brasil), tiende a liberalizar aún más las disposiciones adquiridas, si bien no resultan todavía muy eficientes los mecanismos de transferencia tecnológica hacia terceros países, casi siempre los más necesitados de una información tan valiosa sobre sus propios recursos naturales.

1.5. Las ventajas de la observación espacial

La teledetección desde satélite cuenta con numerosas aplicaciones, gracias a las ventajas que ofrece frente a otros medios de observación más convencionales, como la fotografía aérea o los trabajos de campo, aunque más que sustituirlos los complementa adecuadamente. Entre las ventajas de esta observación espacial, podemos destacar las siguientes:

1.5.1. Cobertura global y periódica de la superficie terrestre

Gracias a las características orbitales del satélite podemos obtener imágenes repetitivas de la mayor parte de la Tierra, incluso de áreas inaccesibles por otros medios, como es el caso de las zonas polares o desérticas. Esto permite, por ejemplo, realizar un seguimiento de grandes icebergs, reduciéndose los accidentes en la navegación ártica, detectar incendios forestales o emisiones incontroladas de petróleo.

La dimensión global que aportan estas imágenes resulta de enorme trascendencia para entender los grandes procesos que afectan al medio ambiente de nuestro planeta (Walker y Turner, 1990). Fenómenos que preocupan notablemente a la comunidad científica, y aun al hombre de la calle, como el deterioro de la capa de ozono, el calentamiento de la Tierra o los procesos de desertización, sólo pueden ser entendidos bajo una consideración global —el planeta en su conjunto—, para lo que necesitamos un sistema de información que abarque grandes espacios.

Junto a ello, resulta preciso contar con una observación cíclica, ya que buena parte de estos fenómenos tienen un enorme dinamismo. Los proyectos futuros de observación terrestre, como la estación orbital europea (*Polar Orbiting Earth Observation Mission*, POEM-1), que incorporará múltiples instrumentos para la observación de la atmósfera, los océanos y las tierras emergidas, la japonesa (denominada JPOP) y la norteamericana (EOS), facilitarán una cobertura global y periódica de nuestro Planeta, haciendo más accesible el entendimiento de sus principales procesos medioambientales (Asrar, 1990; Goetz, 1991).

Aunque más tarde veremos con mayor detalle el interés de este análisis multitemporal (cap. 7.3), pueden aquí citarse otros ejemplos del interés de la observación periódica, como serían el seguimiento de procesos de desertificación (Wald, 1990) o de inundaciones (fig. 1.3), la predicción de la escorrentía en coberturas de nieve (Ferris y Congalton, 1989), el cálculo de la deforestación (Nelson et al., 1987), y, por supuesto, la dinámica de los fenómenos meteorológicos (Nicholson, 1989; Millington et al., 1994).

1.5.2. Visión panorámica

La altura orbital del satélite le permite detectar grandes espacios, proporcionando una visión amplia de los hechos geográficos. Una fotografía aérea, escala 1:18.000 capta en una sola imagen un superficie aproximada de 16 km², que asciende a unos 49 km² en el caso de fotografías a mayor altitud (escala 1:30.000). Una imagen del satélite Landsat nos permite contemplar 34.000 km² en una sola adquisición, cifrándose en 9 millones de km² los abarcados por una sola imagen del satélite meteorológico NOAA. Determinados fenómenos de gran radio de cobertura se pueden delimitar a partir de estas imágenes, siendo de difícil percepción para perspectivas más locales. El abombamiento de la Meseta española, por ejemplo, fue detectado a partir de las primeras imágenes Landsat que se obtuvieron de nuestro país (Alía et al., 1976), corrigiendo en parte la visión tradicional que se tenía de esta unidad del relieve. Sobre imágenes de satélite resulta más asequible la detección de algunas fallas, fracturas o contactos litológicos, lo que puede guiar en la localización de algunos recursos minerales (Short y Blair, 1986).

Es importante anotar que esta vasta superficie es detectada casi instantáneamente y por el mismo sensor. En consecuencia, la información incluida en tan amplio territorio es perfectamente comparable. Esto permite, por ejemplo, utilizar imágenes para extrapolar cálculos extraídos de un muestreo, como serían los dedicados a obtener temperatura o clorofila en el agua (López y Caselles, 1989), humedad o índices de área foliar de la vegetación (Tucker, 1978), o predicción de cosechas, de tanta repercusión para paliar crisis alimentarias de gravísimas repercusiones (Allan, 1986).

1.5.3. Información sobre regiones no visibles del espectro

Los sensores ópticos-electrónicos facilitan imágenes sobre áreas no accesibles al ojo humano o la fotografía convencional, como es el caso del infrarrojo medio y térmico o las micro-ondas. Estas bandas del espectro proporcionan una valiosa información para estudios medioambientales. Por ejemplo, el infrarrojo térmico nos permite estudiar la distribución espacial de las temperaturas, con mayor detalle sobre la superficie marina gracias a la homogeneidad de su composición

(López, 1990). El seguimiento de corrientes marinas, la detección de surgencias o focos anómalos de calor son buenos ejemplos del interés de este tipo de información.

Por otra parte, el infrarrojo medio también resulta de gran interés para la detección de focos de altas temperaturas, como es el caso de los incendios forestales, que pueden delimitarse con bastante precisión (Chuvieco y Martín, 1994b). También en esta banda pueden detectarse escapes radioactivos de cierta envergadura, como fue el caso del ocurrido en Chernobyl el verano de 1986, confirmado a partir de imágenes Landsat (fig. 1.4) antes de que las autoridades soviéticas reconocieran la gravedad del suceso.

En el campo de las micro-ondas, la teledetección espacial puede aportar un flujo de información prácticamente inédito. Permite adquirir, por ejemplo, imágenes sobre áreas donde la cobertura nubosa es muy constante, ampliando la cobertura cartográfica en sectores donde no son operativos los medios convencionales. Los estudios oceanográficos o la cartografía detallada de la cobertura nival (Hall, 1988; Chang et al., 1990) son otros campos en donde la observación en esta banda del espectro resulta crucial.

1.5.4. Formato digital

Como se comentó más arriba, el tratamiento digital de las imágenes agiliza el proceso de interpretación, permite generar modelos cuantitativos e integrar los resultados con otro tipo de información geográfica. Este enfoque integrado facilita una evaluación más real del paisaje, al considerar los principales elementos espa-

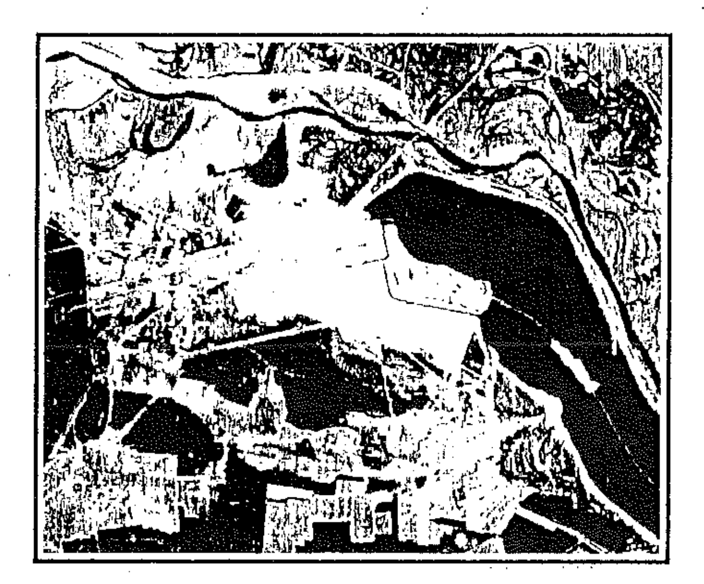


Fig. 1.4 - *Imagen Landsat de la central nuclear de Chernobyl (Ucrania) adquirida el 29 de agosto de 1992 (cortesía Eurimage)*

ciales que lo conforman. Aun simplemente en el terreno de la visualización, el apoyo de los ordenadores permite observar el territorio con una precisión y plasticidad difícilmente abordable por otros medios. Este es el caso de las perspectivas tridimensionales, que combinan una imagen de satélite con un modelo topográfico digital. El terreno puede así observarse desde distintos ángulos (fig. 1.5), diseñar trayectorias animadas, o simular los efectos de distintas actuaciones sobre el territorio antes de que se produzcan, evitando así pérdidas irreparables.

Esta relación no implica, naturalmente, que consideremos a la teledetección espacial como una panacea para detectar cualquier problema que afecte al medio ambiente. También presenta algunas limitaciones, como son las derivadas de la resolución espacial, espectral o temporal actualmente disponibles, que pueden no ser suficientes para resolver un cierto problema. Por ejemplo, los estudios de morfología urbana están seriamente limitados con las resoluciones espaciales actuales, aunque esto puede mejorarse en los próximos años. Además, la cobertura de nubes puede reducir notablemente en algunas zonas la frecuencia temporal proporcionada por estos sistemas espaciales, restringiéndose la observación de esas áreas a la proporcionada por los sistemas de radar (3.4.1). Finalmente, es obvio que sólo será posible distinguir fenómenos que impliquen modificar la forma en que una cubierta radia energía. Por ejemplo, no pueden discriminarse sobre una imagen de satélite variables que se desarrollan en profundidad (como el perfil de un suelo) o las que se refieren al uso del territorio, siempre que no implique un cambio de cobertura: un gran centro comercial sí implica un cambio de ocupación del suelo, pero no el uso comercial minorista, habitualmente situado en el mismo edificio —y por tanto, con la misma cubierta— que un uso residencial en altura.

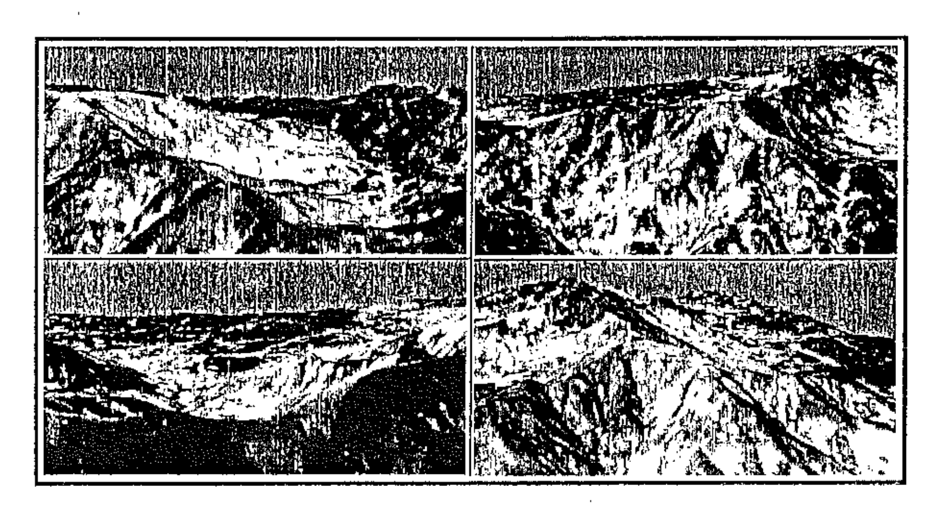


Fig. 1.5 - *Diversas perspectivas tridimensionales de una imagen Landsat TM sobre la Sierra de Gredos*

Es obvio, en definitiva, que esta observación es complementaria con otras técnicas convencionales, como la fotografía aérea, y que no invalida la importancia del trabajo de campo. En otras palabras, es una técnica auxiliar más, idónea en múltiples contextos y discreta en otros, en los que su aplicación resulta sólo un ensayo experimental.

1.6. Fuentes bibliográficas[3]

Como antes se indicó la teledetección es una técnica bastante reciente, pese a lo cual la producción bibliográfica resulta ya considerable. En el panorama internacional, se cuenta con numerosos congresos, revistas especializadas, manuales e informes de investigación centrados en esta tecnología. Esto explica la existencia de diversos catálogos bibliográficos (Carter, 1986; Hyatt, 1988), y de varias series periódicas dedicadas a la recopilación de literatura científica en este campo. Los más importantes, a este respecto, son: *Earth Resources: A Continuing Bibliography with Indexes*, publicada por NASA desde 1962, y *Geographical Abstracts, G: Remote Sensing, Photogrammetry and Cartography*, publicada por Geo Abstracts. En la misma línea, se sitúa la creación de bases bibliográficas especializadas en teledetección, caso de la canadiense RESORS (*Remote Sensing Online Retrieval System*), o la inglesa GEOBASE.

Los Congresos más destacados son los que organizan las sociedades profesionales: *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ISPRS), *American Society of Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS), *Remote Sensing Society* (RSS), y *European Association of Remote Sensing Laboratories* (EARSeL). El primero cuenta con periodicidad cuatrienal y los tres últimos son anuales. Tienen también gran prestigio la serie de congresos denominados *International Symposium on Remote Sensing of Environment*, organizados por el ERIM, los denominados *Machine Processing of Remotely Sensed Data*, que coordina el LARS, y los *Pecora Symposium*, también de la ASPRS, aunque centrados únicamente en aplicaciones medio ambientales.

En el capítulo de revistas especializadas, las más destacadas son: *Canadian Journal of Remote Sensing, Geocarto International, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, International Journal of Remote Sensing, ITC Journal, Photogrammetria, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Remote Sensing of Environment, Remote Sensing Quartely, Remote Sensing Reviews y ISPRS Journal of Photogrammetry*. En función de los índices de impacto, en

[3] Un análisis más detallado de las principales fuentes bibliográficas disponibles en teledetección puede verse en el número especial de la revista Serie Geográfica dedicado a la enseñanza de esta técnica (y especialmente Chuvieco, 1992b).

1993 la más prestigiosa era *Remote Sensing of Environment* (1,46), seguida de *International Journal of Remote Sensing* (0,783), *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* (0,741) y *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* (0,504) (Jensen, 1995).

En cuanto a manuales universitarios, buena muestra del grado de desarrollo alcanzado por esta técnica es la amplia gama de textos disponibles, una buena parte de ellos de reciente publicación. Entre las principales referencias de este tipo, se cuentan las obras de Barret y Curtis (1992, 2ª edición), Bonn y Rochon (1992), Campbell (1987), Colwell (1983), Curran (1985), Girard y Girard (1989), Hall y Martinec (1985), Harris (1987), Harper (1983), Holz (1985), Jensen (1996, 2ª edición), Lillesand y Kiefer (1994, 3ª edición), Lira (1987), Lo (1986), Mather (1987), Mulders (1987), Pinilla (1995), Richards (1993, 2ª edición), Sabins (1987), Schowengerdt (1983), Short (1982), Swain y Davis (1978), Szekielda (1988), Townshend (1981), Verbyla (1995).

Para cuestiones didácticas resultan también de gran interés los catálogos de imágenes disponibles, que recogen una amplia variedad de imágenes adquiridas por distintos sensores espaciales. Entre las más interesantes se cuentan: *Mission to Earth: Landsat views of the World* (NASA, 1976), *Earth Watch* (Sheffield, 1981) y *Man on Earth* (Sheffield, 1983). Todas ellas están basadas exclusivamente sobre imágenes Landsat, mientras *Images of Earth* (Francis y Jones, 1984) incluye algunas fotografías tomadas desde el transbordador espacial norteamericano. Con un criterio más cartográfico, destaca la obra de la casa alemana Westerman, traducida posteriormente al inglés (Smith, 1984), así como la cobertura de imágenes del Reino Unido (Bullard y Dixon, 1985), de Venezuela (Ruiz, 1992), magníficamente cuidado, y de algunas regiones españolas (Sancho y Chuvieco, 1986; Sancho, 1992; Moreira y Ojeda, 1992), que presentan numerosos ejemplos de análisis ambiental sobre las imágenes. También con un enfoque cartográfico conviene citar la obra de varios autores del Este europeo (Sagdejew et al., 1982), con la novedad de incorporar fotografías adquiridas por plataformas soviéticas, poco accesibles hasta hace unos años en los países occidentales. Más recientemente, se han publicado algunos libros más temáticos, como el dedicado a las ciudades del mundo (Au, 1993), y el que revisa los principales paisajes de Iberoamérica (Sancho y Chuvieco, 1992). Finalmente, los trabajos de la institución Smithsonian (Strain y Engle, 1993) y de la Sociedad Audobon (National Audobon Society, 1995), abarcan un amplio abanico de sensores y países.

La creciente accesibilidad a las redes mundiales de comunicación, y más concretamente de Internet, permitirá en el futuro una mayor transferencia de materiales didácticos e imágenes entre centros distantes. Ya existen varios organismos que facilitan por este medio acceso a sus catálogos de imágenes, mientras otros permiten copiarlas libremente, o al menos versiones ligeramente degradadas de las mismas (véase el anexo I).



Principios Físicos de la Teledetección

«Acaso el mejor conversador del mundo es el que ayuda a hablar a los demás.»

[John Steinbeck, *Al Este del Edén*]

En el capítulo anterior se presentaban algunos aspectos introductorios de las técnicas analizadas en esta obra. En los dos próximos, se van a exponer los procesos que permiten la adquisición de la imagen, para dedicar el resto a las tareas de interpretación. Como científicos con preocupación por el medio ambiente, lo habitual será que estos últimos sean los que merezcan una mayor atención. Sin embargo, como es obvio, la interpretación de la imagen será tanto más rigurosa, cuanto mayor conocimiento se tenga de los procesos que permitieron adquirirla.

2.1. Fundamentos de la observación remota

Anteriormente se definió la teledetección como aquella técnica que nos permite obtener información a distancia de los objetos situados sobre la superficie terrestre. Para que esta observación remota sea posible, es preciso que entre los objetos y el sensor exista algún tipo de interacción. Nuestros sentidos perciben un objeto sólo cuando pueden descifrar la información que éste les envía. Por ejemplo, somos capaces de ver un árbol porque nuestros ojos reciben y traducen convenientemente una energía luminosa procedente del mismo. Esa señal, además, no es originada por el árbol, sino por un foco energético exterior que le ilumina. De ahí que no seamos capaces de percibir ese árbol en plena oscuridad.

Este sencillo ejemplo nos sirve para introducir los tres principales elementos de cualquier sistema de teledetección: sensor (nuestro ojo), objeto observado (árbol) y flujo energético que permite poner a ambos en relación. En el caso del ojo, ese flujo procede del objeto por reflexión de la luz solar. Podría también tratarse de un tipo de energía emitida por el propio objeto, o incluso por el sensor. Éstas son, precisamente, las tres formas de adquirir información a partir de un sensor remoto: por reflexión, por emisión y por emisión-reflexión (fig. 2.1).

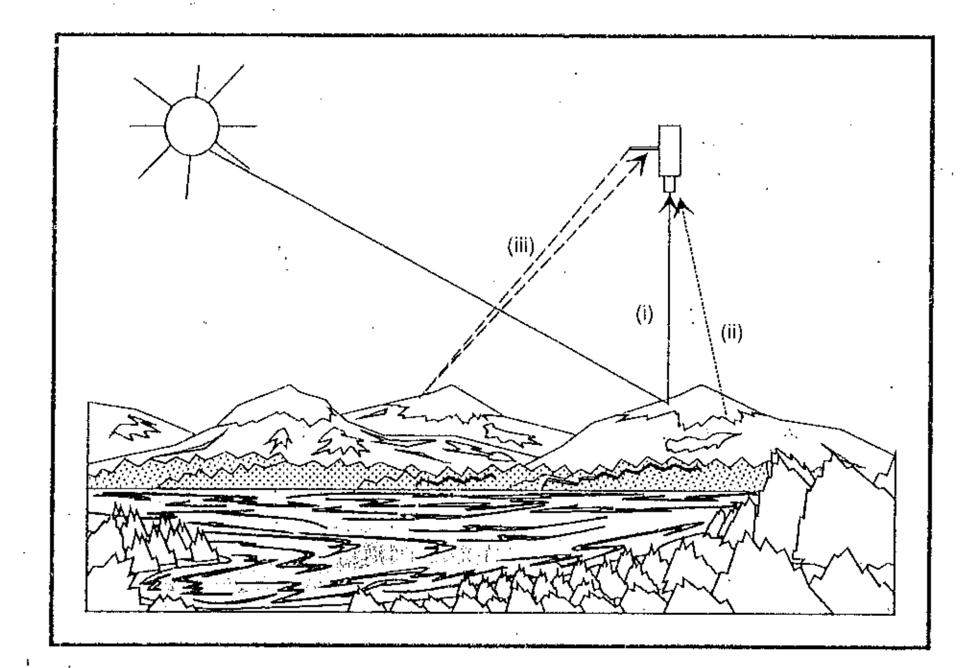


Fig. 2.1 - *Formas de teledetección*

La primera de ellas es la forma más importante de teledetección, pues se deriva directamente de la luz solar, principal fuente de energía de nuestro Planeta. El sol ilumina la superficie terrestre, que refleja esa energía en función del tipo de cubierta presente sobre ella. Ese flujo reflejado se recoge por el sensor, que lo transmite posteriormente a las estaciones receptoras. Entre superficie y sensor se interpone la atmósfera, que dispersa y absorbe parte de la señal original. De igual forma, la observación remota puede basarse en la energía emitida por las propias cubiertas, o en la que podríamos enviar desde un sensor que fuera capaz, tanto de generar su propio flujo energético, como de recoger posteriormente su reflexión sobre la superficie terrestre.

En cualquiera de estos casos, el flujo energético entre la cubierta terrestre y el sensor constituye una forma de radiación electro-magnética. Como es sabido, la energía se transfiere de un lugar a otro por tres procesos: convección, conducción, y radiación. De ellos, nos centraremos en este último, pues constituye la base de los sistemas de teledetección analizados en esta obra.

Históricamente las propiedades de la radiación electro-magnética se han explicado por dos teorías aparentemente contrapuestas: aquella que la concibe como un haz ondulatorio (Huygens, Maxwell), y aquella otra que la considera como una sucesión de unidades discretas de energía, fotones o cuantos, con masa igual a cero (Planck, Einstein). Actualmente, parece que las dos teorías se pueden compaginar, pues se ha demostrado que la luz puede comportarse de acuerdo a ambos planteamientos.

Según la teoría ondulatoria, la energía electro-magnética se transmite de un lugar a otro siguiendo un modelo armónico y continuo, a la velocidad de la luz y conteniendo dos campos de fuerzas ortogonales entre sí: eléctrico y magnético (fig. 2.2). Las características de este flujo energético pueden describirse por dos elementos: longitud de onda (λ) y frecuencia (F). La primera hace referencia a la distancia entre dos picos sucesivos de una onda, mientras que la frecuencia designa el número de ciclos pasando por un punto fijo en una unidad de tiempo. Ambos elementos están inversamente relacionados:

$$c = \lambda F \qquad [2.1]$$

donde c indica la velocidad de la luz (3×10^8 m/s), λ expresa la longitud de onda (habitualmente en micrómetros, 1 $\mu m = 10^{-6}$ m) y F la frecuencia (Hertzios, ciclos por segundo). En definitiva, a mayor longitud de onda, menor frecuencia y viceversa, por lo que basta con indicar un solo término para identificar propiamente el tipo de energía mencionado.

Gracias a la teoría cuántica podemos calcular la cantidad de energía transportada por un fotón, siempre que se conozca su frecuencia:

$$Q = h F \qquad [2.2]$$

donde Q es la energía radiante de un fotón (en julios), F la frecuencia y h la constante de Planck ($6{,}6 \times 10^{-34}$ J s). Sustituyendo en [2.1], podemos asimismo expresar:

$$Q = h (c/\lambda) \qquad [2.3]$$

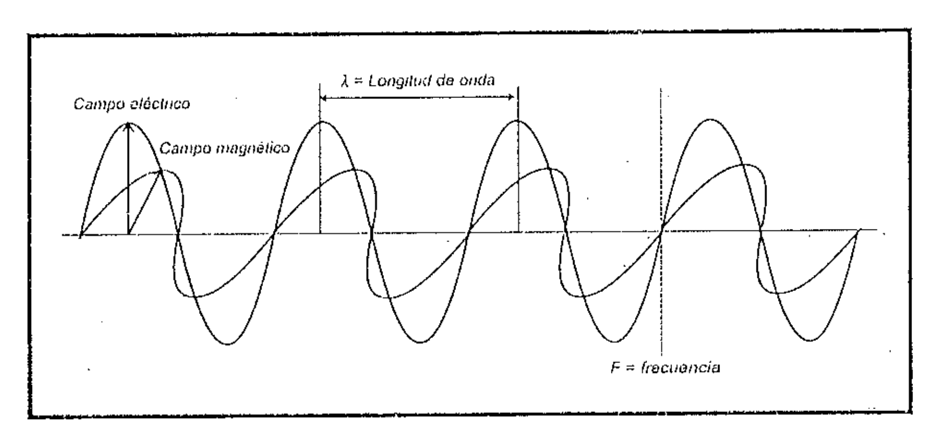


Fig. 2.2 - *Esquema de una onda electro-magnética*

lo que significa, en definitiva, que a mayor longitud de onda —o menor frecuencia— el contenido energético será menor y viceversa. Esto implica que la radiación en longitudes de onda largas es más difícil de detectar que aquélla proveniente de longitudes cortas, de ahí que las primeras requerirán medios de detección más refinados.

2.2. El espectro electro-magnético

De las fórmulas anteriores, se deduce que podemos definir cualquier tipo de energía radiante en función de su longitud de onda o frecuencia. Aunque la sucesión de valores de longitud de onda es continua, suelen establecerse una serie de bandas en donde la radiación electro-magnética manifiesta un comportamiento similar. La organización de estas bandas de longitudes de onda o frecuencia se denomina espectro electro-magnético (fig. 2.3). Comprende desde las longitudes de onda más cortas (rayos gamma, rayos X), hasta las kilométricas (tele-comunicaciones). Las unidades de medida más comunes se relacionan con la longitud de onda. Para las más cortas se utilizan micrómetros, mientras las más largas se miden en centímetros o metros. Normalmente a estas últimas (denominadas micro-ondas) se las designa también por valores de frecuencia (en Gigahertzios, GHz = 10^9 Hz).

Desde el punto de vista de la teledetección, conviene destacar una serie de bandas espectrales, que son las más frecuentemente empleadas con la tecnología actual. Su denominación y amplitud varían según distintos autores, si bien la terminología más común es la siguiente:

- Espectro visible (0.4 a 0.7 µm). Se denomina así por tratarse de la única radiación electro-magnética que pueden percibir nuestros ojos, coincidiendo con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar. Suelen distinguirse tres bandas elementales, que se denominan azul (0.4 a 0.5 µm); verde (0.5 a 0.6 µm), y rojo (0.6 a 0.7 µm), en razón de los colores primarios que nuestros ojos perciben a esas longitudes de onda.

- Infrarrojo próximo (0.7 a 1.3 µm). A veces se denomina también infrarrojo reflejado o fotográfico, puesto que parte de él puede detectarse a partir de filmes dotados de emulsiones especiales. Resulta de especial importancia por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.

- Infrarrojo medio (1.3 a 8 µm), en donde se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre. Re-

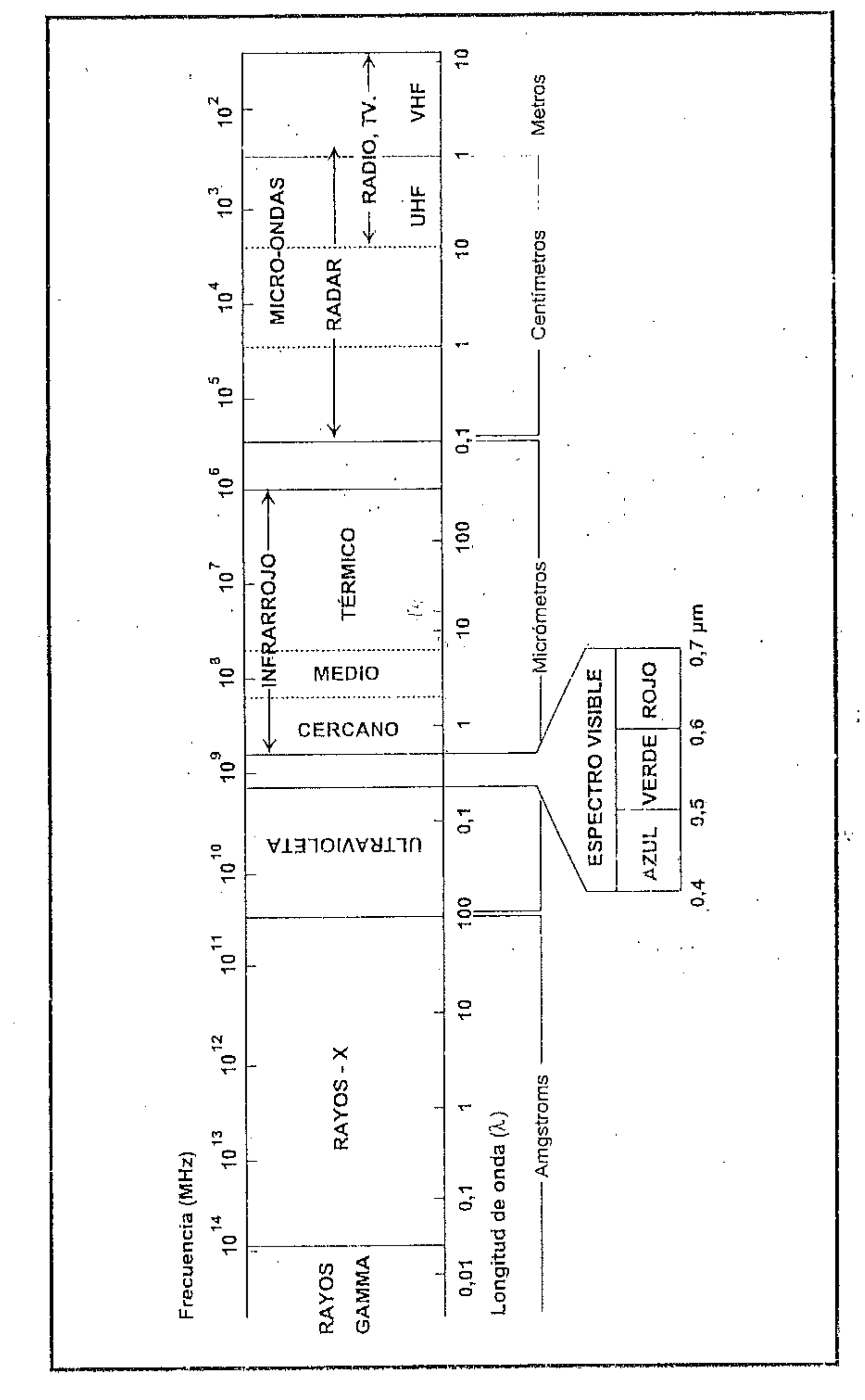


Fig. 2.3 - *Espectro electro-magnético*

sulta idóneo para estimar contenido de humedad en la vegetación y detección de focos de alta temperatura.

- Infrarrojo lejano o térmico (8 a 14 μm), que incluye la porción emisiva del espectro terrestre, en donde se detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.

- Micro-ondas (a partir de 1 μm), con gran interés por ser un tipo de energía bastante transparente a la cubierta nubosa.

Más adelante se estudiará el comportamiento espectral de las principales cubiertas terrestres en cada una de estas bandas del espectro. Antes de ello, convendrá introducir algunos conceptos y unidades de medida comúnmente empleados en teledetección.

2.3. Términos y unidades de medida

Como más arriba se indicó, para que pueda producirse una observación remota de la superficie terrestre es preciso que el sensor detecte un flujo energético proveniente de ésta. Ese flujo tiene una intensidad determinada, proveniente de, o dirigida a, una unidad de superficie y con una dirección concreta. Convendrá, por tanto, explicitar las unidades de medida más empleadas en teledetección, con objeto de ser rigurosos a la hora de presentar posteriormente los procesos de adquisición. La formulación precisa de cada una de estas magnitudes se acompaña en la tabla 2.1 (Slater, 1980; Curran, 1985; Elachi, 1987):

- Energía radiante (Q). Indica el total de energía radiada en todas las direcciones. Se mide en julios (J).

- Densidad radiante (W). Total de energía radiada en todas las direcciones por unidad de volumen. Se mide en julios por metro cúbico (J m^{-3}).

- Flujo radiante (ϕ). Total de energía radiada en todas las direcciones por unidad de tiempo. Se mide en vatios (W).

- Emitancia o excitancia radiante (M). Total de energía radiada en todas las direcciones **desde** una unidad de área y por unidad de tiempo. Se mide en vatios por metro cuadrado (W m^{-2}).

- Irradiancia radiante (E), total de energía radiada **sobre** una unidad de área y por unidad de tiempo. Es equivalente a la emitancia, si bien ésta indica la energía emitida, mientras la irradiancia refiere a la incidente (W m^{-2}).

Concepto	Símbolo	Fórmula	Unidad de Medida
Energía radiante	Q	—	julios (J)
Densidad radiante	W	$\delta Q/\delta v$	J m^{-3}
Flujo radiante	ϕ	$\delta Q/\delta t$	vatios (W)
Emitancia radiativa	M	$\delta\phi/\delta A$	W m^{-2}
Irradiancia	E	$\delta\phi/\delta A$	W m^{-2}
Intensidad radiativa	I	$\delta\phi/\delta\Omega$	W sr^{-1}
Radiancia	L	$\delta I/(\delta A \cos\theta)$	W m^{-2} sr^{-1}
Radiancia espectral	L_λ	$\delta L/\delta\lambda$	W m^{-2} sr^{-1} μm^{-1}
Emisividad	ε	M/M_n	
Reflectividad	ρ	ϕ_r/ϕ_i	
Absortividad	α	ϕ_a/ϕ_i	
Transmisividad	τ	ϕ_t/ϕ_i	

sr. estereo-radián, medida del ángulo sólido
μm. micrómetro o micra (10^{-6} metros)
M_n. Emitancia de un cuerpo negro
ϕ_i. flujo incidente
ϕ_r. flujo reflejado
ϕ_a. flujo absorbido
ϕ_t. flujo transmitido
θ. ángulo formado por el flujo y la dirección normal

Tabla 2.1 - *Magnitudes radiométricas comúnmente utilizadas en Teledetección*

- Intensidad radiante (I). Total de energía radiada por unidad de tiempo y por ángulo sólido (Ω). Se trata éste de un ángulo tridimensional, que refiere a la sección completa de la energía transmitida, y se mide en estéreo-radianes (fig. 2.4). Por tanto la intensidad radiante se mide en vatios por estéreo-radián (W sr^{-1}).

- Radiancia (L). Total de energía radiada en una determinada dirección por unidad de área y por ángulo sólido de medida. Es un término fundamental en teledetección, ya que describe precisamente lo que mide el sensor. Se cuantifica en vatios por metro cuadrado y estéreo-radián (W m^{-2} sr^{-1}).

- Radiancia espectral (L_λ). Por extensión del concepto anterior, indica el total de energía radiada en una determinada longitud de onda por unidad de área y por ángulo sólido de medida. Por cuanto el sensor detecta una banda particular del espectro, ésta es la medida más cercana a la observación remota. De igual forma que la radiancia, la emitancia e irradiancia

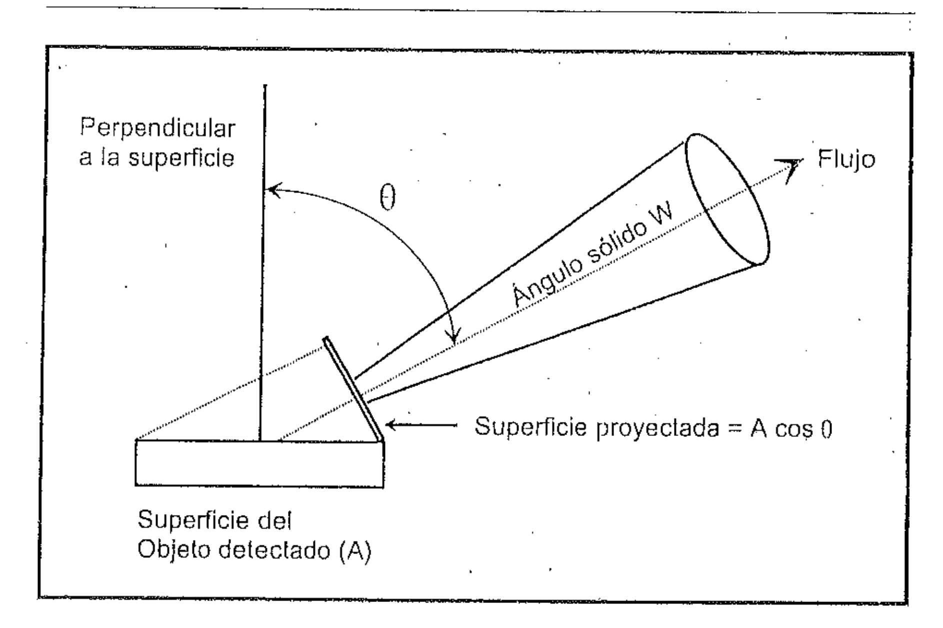


Fig. 2.4 - *Diagrama de un ángulo sólido*

pueden completarse con el calificativo de espectral (añadiendo el subíndice λ), cuando se refieren a una determinada longitud de onda.

- Emisividad (ε), relación entre la emitancia de una superficie (M), y la que ofrecería un emisor perfecto, denominado cuerpo negro, a la misma temperatura (M_n).
- Reflectividad (ρ), relación entre el flujo incidente y el reflejado por una superficie;
- Absortividad (α), relación entre el flujo incidente y el que absorbe una superficie;
- Transmisividad (τ), relación entre el flujo incidente y el transmitido por una superficie.

Estos últimos términos son adimensionales; suelen expresarse en tantos por ciento o por uno. Por esta razón, hemos traducido los términos ingleses: *emittance, reflectance, absorptance y transmittance*, añadiendo el sufijo «ividad», para indicar que son cantidades relativas, distinguiéndolas así de las anteriores que son absolutas. También estas magnitudes son dependientes de la longitud de onda, por lo que conviene completarlas con el calificativo de espectral, para referirse a su comportamiento en una banda determinada del espectro.

2.4. Principios y leyes de la radiación electro-magnética

El objeto de este capítulo es caracterizar espectralmente las distintas cubiertas de interés medio ambiental. Para ello, resulta obligado comentar los procesos más importantes que permiten explicar ese comportamiento, así como los factores que intervienen en su variación. Esta base permitirá abordar una interpretación más rigurosa de la imagen finalmente obtenida por el sensor.

De acuerdo a la fórmula [2.3], la cantidad de energía que contiene un flujo radiante es inversamente proporcional a su longitud de onda. Esta relación entre flujo de energía y longitud de onda, puede establecerse con mayor rigor gracias a la ley de Planck:

$$M_{n,\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left\{ \exp\left(\frac{hc}{\lambda kT} \right) - 1 \right\}} \qquad [2.4]$$

donde $M_{n,l}$ indica la emitancia radiativa espectral de un cuerpo negro a una determinada longitud de onda (λ); h es la constante de Planck ($6{,}626 \times 10^{-34}$ W s²); k, la constante de Boltzmann ($1{,}38 \times 10^{-23}$ W s² K^{-1}); c, la velocidad de la luz; λ, la longitud de onda, y T, la temperatura absoluta de un cuerpo negro (en Kelvin, K). Esta fórmula se puede simplificar sustituyendo algunos términos por constantes:

$$M_{n,\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5 \left\{ \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T} \right) - 1 \right\}} \qquad [2.5]$$

donde c_1 puede sustituirse por $3{,}741 \times 10^8$ W m^{-2}µm^4 y c_2 por $1{,}438 \times 10^4$ µm K.

En pocas palabras, la fórmula de Planck nos señala que cualquier objeto por encima del cero absoluto (-273 °C) radia energía, y que ésta incrementa con la temperatura. A la vez, a mayor temperatura, ese cuerpo radiará con más intensidad en longitudes de onda más cortas. De esta fórmula podemos reconstruir la curva de emitancia de un cuerpo negro a distintas temperaturas (fig. 2.5). El gráfico es muy interesante para conocer el comportamiento radiativo de un objeto, siempre que conozcamos su temperatura y su emisividad; esto es, su grado de similitud con un cuerpo negro.

A partir de la fórmula de Planck puede calcularse la longitud de onda a la que se produce la máxima emitancia de un cuerpo negro conociendo su temperatura (T). Esta es la llamada ley del desplazamiento de Wien:

$$\lambda_{max} = 2898 \text{ µm K} / T \qquad [2.6]$$

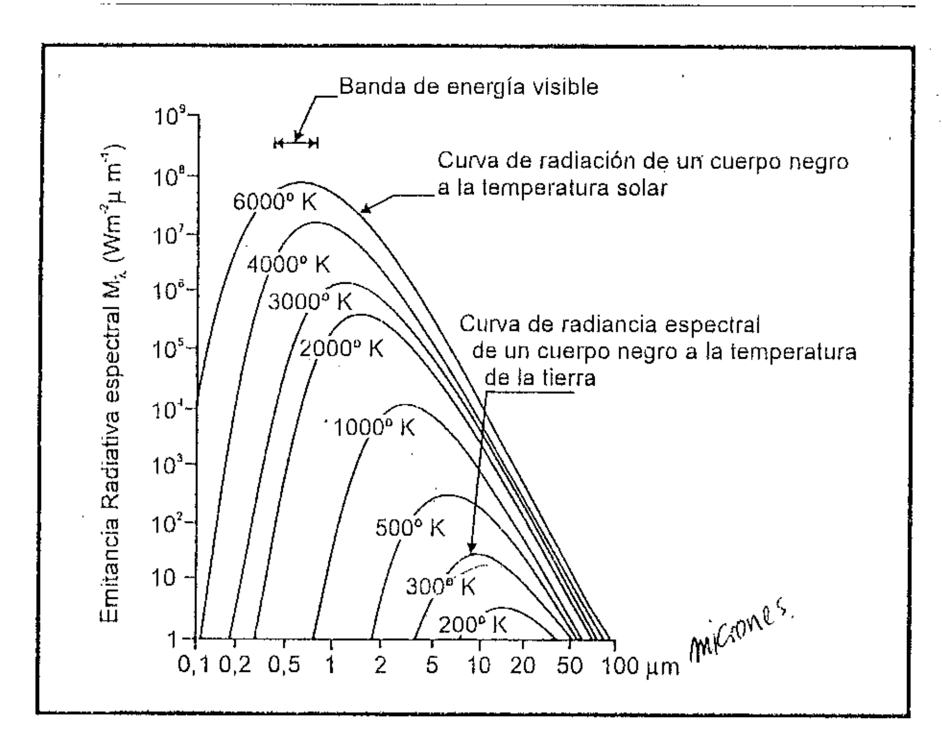


Fig. 2.5 - *Curva de emitancia radiativa de un cuerpo negro a distintas temperaturas*

que tiene una gran importancia para seleccionar la banda más conveniente para detectar una determinada cubierta, siempre que se conozca su temperatura. Por ejemplo, en el caso de los incendios forestales, teniendo en cuenta que la temperatura de combustión se sitúa entre 540 y 700 K, la ley de Wien nos permite situar entre 5,28 y 4,30 µm (infrarrojo medio) la banda espectral más adecuada para su detección. Por su parte, el sol —con una temperatura radiante próxima a los 6.000 K— presenta su máxima emitancia en la región del espectro visible (0,4 a 0,7 µm). En pocas palabras, cuanto más caliente esté el objeto emisor radiará a longitudes de onda más cortas.

Integrando la emitancia espectral de un cuerpo negro para todas las longitudes de onda, podemos calcular el total de energía que radia por unidad de superficie. Esta es la ley de Stefan-Boltzmann:

$$M_n = \sigma T^4 \quad [2.7]$$

donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8}$ W m^{-2} K^{-4}), y T la temperatura en Kelvin. A consecuencia de esta fórmula, resulta evidente que la emitancia global de un objeto es una función de su temperatura, y que pequeños cambios en ésta suponen notables modificaciones en su emitancia radiante. Por otra parte, conociendo la temperatura de un objeto emisor, podemos también estimar la irradiancia incidente sobre el sensor, por cuanto emitancia e irradiancia son funcionalmente equivalentes.

Hasta aquí, hemos supuesto que las superficies naturales se comportan como cuerpos negros, lo que implica una notable simplificación. Por ello, se han de corregir las fórmulas anteriores añadiendo un nuevo parámetro, la emisividad:

$$M = \varepsilon M_n \quad [2.8]$$

La emisividad ya se definió como el grado de similitud entre la emitancia radiante de un objeto y la que presentaría un cuerpo negro a la misma temperatura. Un cuerpo negro indica un emisor perfecto; esto es, un objeto que absorbe y emite toda la energía que recibe. Se habla de cuerpos blancos o reflectores perfectos, cuando no absorben nada de la energía incidente, sino que la reflejan por completo (emisividad = 0), mientras serían cuerpos grises a aquellos objetos que absorben y emiten de forma constante en distintas longitudes de onda. Cuando la emisividad varía con la longitud de onda, se emplea el término de radiadores selectivos. Son los más frecuentes en la naturaleza. Gracias a ese comportamiento particular, pueden discriminarse de otro tipo de superficies en el infrarrojo térmico.

A partir de las fórmulas [2.4 a 2.8] podemos estimar la emitancia total y espectral de un objeto conociendo su temperatura absoluta, siendo aquélla tanto mayor cuanto más alta sea ésta. En definitiva, la energía emitida desde un objeto es primariamente una función de su temperatura. Pequeños cambios en ésta suponen una modificación sensible de la emitancia total, de acuerdo a [2.7]. Además, conociendo la temperatura de un objeto o cubierta de interés —y dado que pueda estimarse su emisividad—, será posible determinar la banda del espectro más idónea para su discriminación.

Con estas nociones puede abordarse el comentario más detallado de las tres regiones del espectro en donde se realizan procesos de teledetección: longitudes de onda cortas (desde el visible al infrarrojo medio), medias (térmico) y largas (micro-ondas).

2.5. El dominio óptico del espectro

2.5.1. Características de la radiación energética en el espectro óptico

Se denomina dominio óptico del espectro a aquel grupo de longitudes de onda directamente dependientes de la energía solar. También se han incluido en

este epígrafe las correspondientes al infrarrojo medio, cuando los procesos de reflexión son dominantes sobre los de emisión.

En consecuencia, conviene analizar con más detenimiento en este apartado las características espectrales del sol, fuente primordial de energía radiante en nuestro planeta. Más adelante nos detendremos en analizar el comportamiento de las principales coberturas terrestres frente a este tipo de radiación.

El sol se encuentra a una temperatura radiante próxima a los 6.000 K. Esto implica, según la ley de Wien, que su máxima emitancia espectral se produce en torno a las 0,48 μm, coincidente con el color verde apreciado por nuestros ojos. La curva espectral de la radiación solar se asemeja bastante a la de un cuerpo negro a esa temperatura, tal y como aparece en la figura 2.6. En este gráfico se

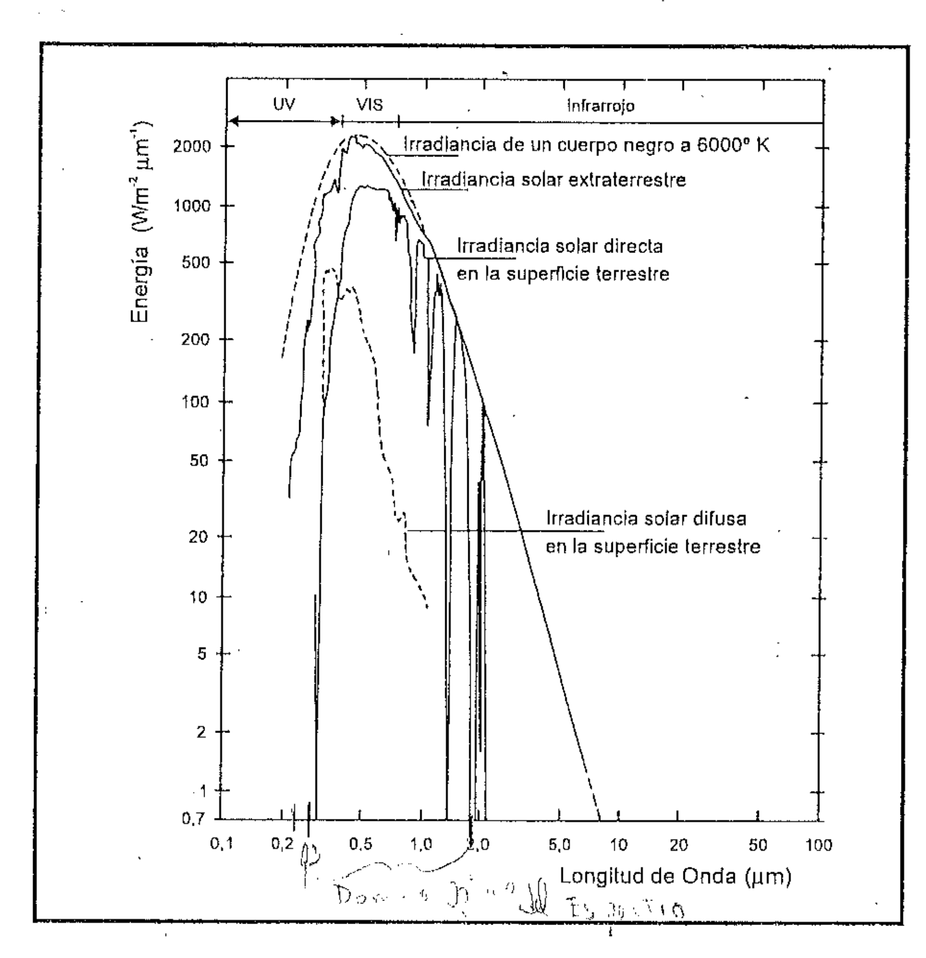


Fig. 2.6 - *Curva de emitancia radiativa del Sol*

observa cómo el sol presenta una banda de elevada emitancia entre 0,3 y 2 μm. A esa banda se le denomina dominio óptico del espectro, y constituye la región de mayor interés para la observación remota de la superficie terrestre.

Hasta aquí se ha considerado el origen de la radiación. Más importante aún para nuestro objetivo es entender cómo este flujo interacciona con la superficie terrestre. La radiación que ésta recibe puede descomponerse en tres términos (fig. 2.7):

$$\phi_i = \phi_r + \phi_a + \phi_t \qquad [2.9]$$

Esto es, el flujo incidente sobre una superficie es reflejado (ϕ_r), transmitido (ϕ_t) o absorbido (ϕ_a). Resulta conveniente expresar esta fórmula en unidades relativas. Para ello, basta dividir cada término de la expresión anterior por ϕ_i:

$$\frac{\phi_i}{\phi_i} = \frac{\phi_r}{\phi_i} + \frac{\phi_a}{\phi_i} + \frac{\phi_t}{\phi_i} \qquad [2.10]$$

o, lo que es lo mismo:

$$1 = \rho + \alpha + \tau \qquad [2.11]$$

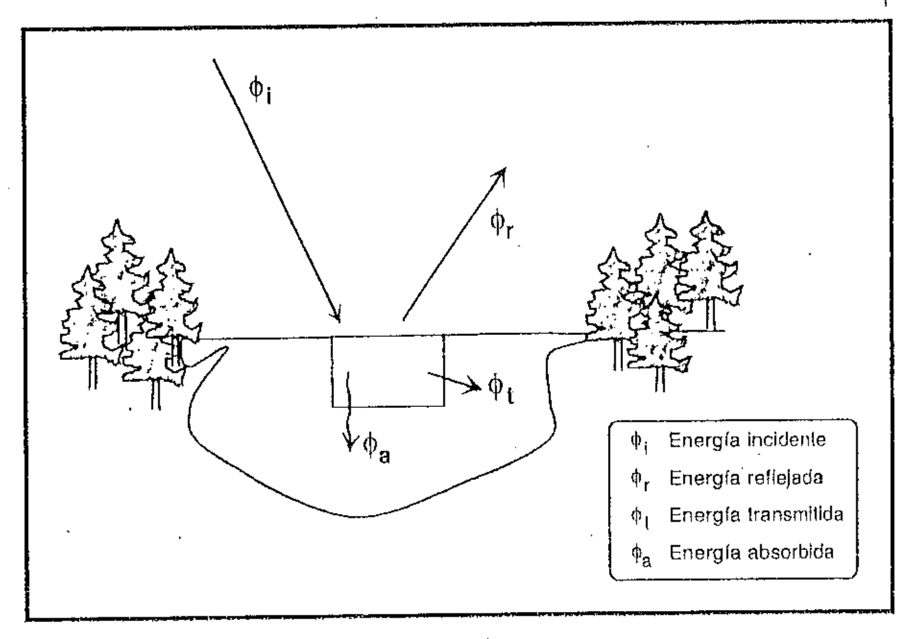


Fig. 2.7 - *Relación entre flujo incidente y reflejado*

En definitiva, la suma de la reflectividad, absortividad y transmisividad ha de ser igual a uno. La relación entre las tres magnitudes no es constante, sino que varía con la longitud de onda; por tanto, en términos más rigurosos, debería expresarse como:

$$1 = \rho_\lambda + \alpha_\lambda + \tau_\lambda \qquad [2.12]$$

La proporción del flujo incidente que es reflejado, absorbido y transmitido depende de las características de la superficie que se observa y de la longitud de onda a la que sea observado. Para poder caracterizar una determinada cubierta, nos resulta muy interesante conocer su comportamiento en diversas longitudes de onda, ya que esto permitirá determinar mejor sus diferencias con respecto a cubiertas espectralmente similares.

En el caso del espectro visible, ese comportamiento disimilar de los objetos a distintas longitudes de onda se manifiesta en lo que llamamos color: un objeto es azul si refleja intensamente la energía en esa banda del espectro y poco en el resto (dicho de otro modo, si absorbe o transmite poca energía incidente sólo en el azul, siendo mayor en el resto), mientras será verde si su reflectividad se centra en esa banda y es baja en otras.

A partir de medidas de laboratorio, se han obtenido unas curvas de reflectividad espectral para las principales cubiertas terrestres (fig. 2.8). Como puede observarse, algunas tienden a presentar una respuesta uniforme en distintas longitudes de onda, mientras otras ofrecen un comportamiento mucho más selectivo. La nieve presenta una reflectividad alta y constante, pues refleja la mayor

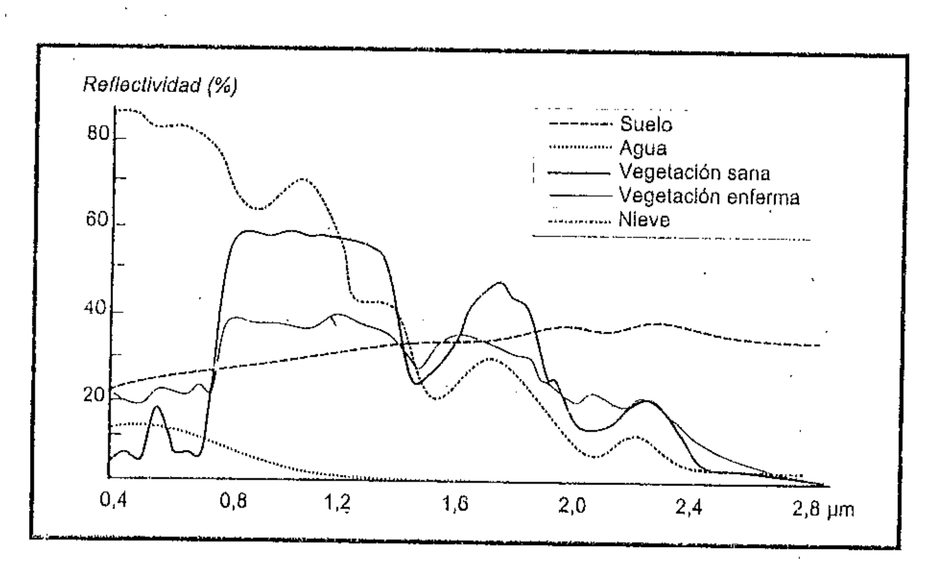


Fig. 2.8 - *Signaturas espectrales típicas de distintas cubiertas*

parte de la energía incidente a distintas longitudes de onda. Por el contrario, el agua absorbe la mayor parte de la energía que recibe, tanto más según nos situamos en longitudes de onda mayores. Por su parte, la vegetación presenta un comportamiento muy cromático, con bajos valores de reflectividad en el espectro visible, más elevados en el infrarrojo cercano y menores en el medio.

Más adelante se analizarán con detalle estos valores teóricos de reflectividad para el caso de la vegetación, agua y suelo. Antes de ello, es importante considerar que el flujo de energía recibido por el sensor no sólo depende de la reflectividad de la cubierta, sino también de otros factores externos. Los más importantes son: (i) las condiciones atmosféricas, (ii) el emplazamiento ambiental de la cubierta y (iii) la geometría de la observación.

Los dos primeros aspectos se tratarán más adelante. En cuanto a las condiciones de observación, conviene tener presente que la cantidad de energía que llega al sensor depende del ángulo con que la superficie refleje la energía incidente, así como del que formen el haz incidente con la posición del sensor. Esta geometría de observación está estrechamente ligada a la rugosidad que presenta la superficie. A este respecto, pueden distinguirse dos tipos de cubiertas (fig. 2.9): aquellas que reflejan la energía con el mismo ángulo del flujo incidente (especulares), y aquellas que lo reflejan uniformemente en todas las direcciones (lambertianas). En el primer caso, el sensor sólo recibe energía reflejada del suelo si está situado en la dirección del ángulo de reflexión, siendo nula en cualquier otro caso. Si la superficie es lambertiana, la radiancia es constante en cualquier ángulo de reflexión.

La mayor parte de las cubiertas tienden a comportarse de modo intermedio entre ambas situaciones, en función de sus características y de la longitud de onda en la que se trabaje. Si la longitud de onda es pequeña, las rugosidades del terreno tenderán a difundir mucho más la energía incidente que si se trata de

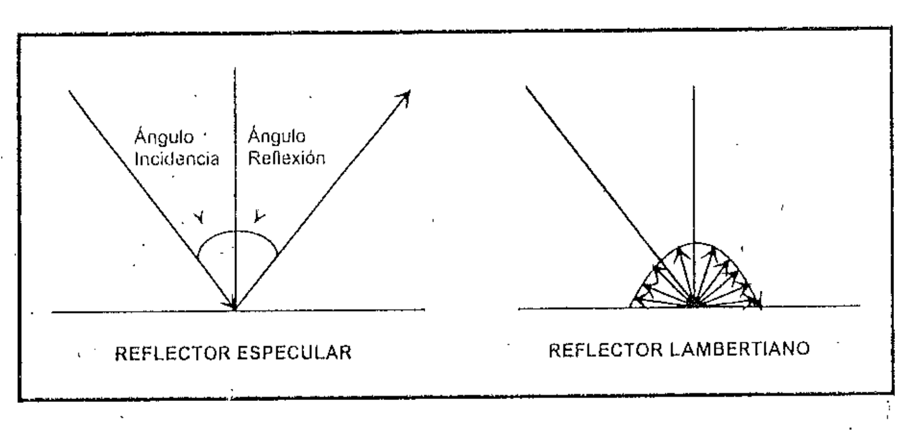


Fig. 2.9 - *Superficies especulares y lambertianas*

longitudes de onda mayores, en donde esas mismas partículas pueden no impedir un comportamiento especular. En el espectro visible, por ejemplo, sólo el agua en calma presenta un carácter casi especular, mientras el resto de las cubiertas tienden a ofrecen un comportamiento difusor. En longitudes de onda mayores (microondas), también otras cubiertas pueden comportarse de modo especular, siempre que la rugosidad del terreno sea suficientemente pequeña.

En cualquier caso, el ángulo de elevación solar y el ángulo de observación juegan un papel muy destacado en la respuesta finalmente obtenida por el sensor. En pocas palabras, el sensor puede registrar un valor distinto de radiancia espectral para un mismo tipo de cubierta —con la misma o similar reflectividad—, si varían las condiciones de observación o de iluminación. Si a este hecho añadimos que la reflectividad presenta variaciones estacionales, muy notables en el caso de las cubiertas vegetales, se subraya la complejidad que la observación remota lleva consigo. En suma, el comportamiento de una cubierta en el espectro visible está influido no sólo por sus propias características, sino también por una serie de factores externos que modifican lo que podríamos llamar su comportamiento espectral teórico. Algunos de estos factores son (fig. 2.10):

- Ángulo de iluminación solar (i), muy dependiente de la fecha del año y del momento de paso del satélite.
- Modificaciones que el relieve introduce en el ángulo de iluminación: orientación de las laderas (ii) o pendiente (iii).
- Influencia de la atmósfera, especialmente en lo que se refiere a la absorción por nubes (iv) y a la dispersión selectiva en distintas longitudes de onda (2.8.2).
- Variaciones medio ambientales en la cubierta: asociación con otras superficies, homogeneidad que presenta, estado fenológico (v), etc.
- Sustrato edafológico o litológico (vi), especialmente influyente cuando la cubierta observada presenta una densidad media.

Estos factores expresan la complejidad que puede entrañar la caracterización de un tipo de cubierta a partir de sensores remotos. También nos sirven para matizar un tanto la validez de las curvas espectrales indicadas previamente, que no deben considerarse más que como reflectividades de referencia. Este modo peculiar con el que una determinada cubierta refleja o emite energía a distintas longitudes de onda se ha denominado comúnmente firma o signatura espectral (Slater, 1980; Meliá et al., 1986), y resulta la base para discriminar dicha cubierta de otras a partir de la observación remota. Ahora bien, como venimos comentando, además del comportamiento espectral propio de cada cubierta, es preciso considerar los factores arriba

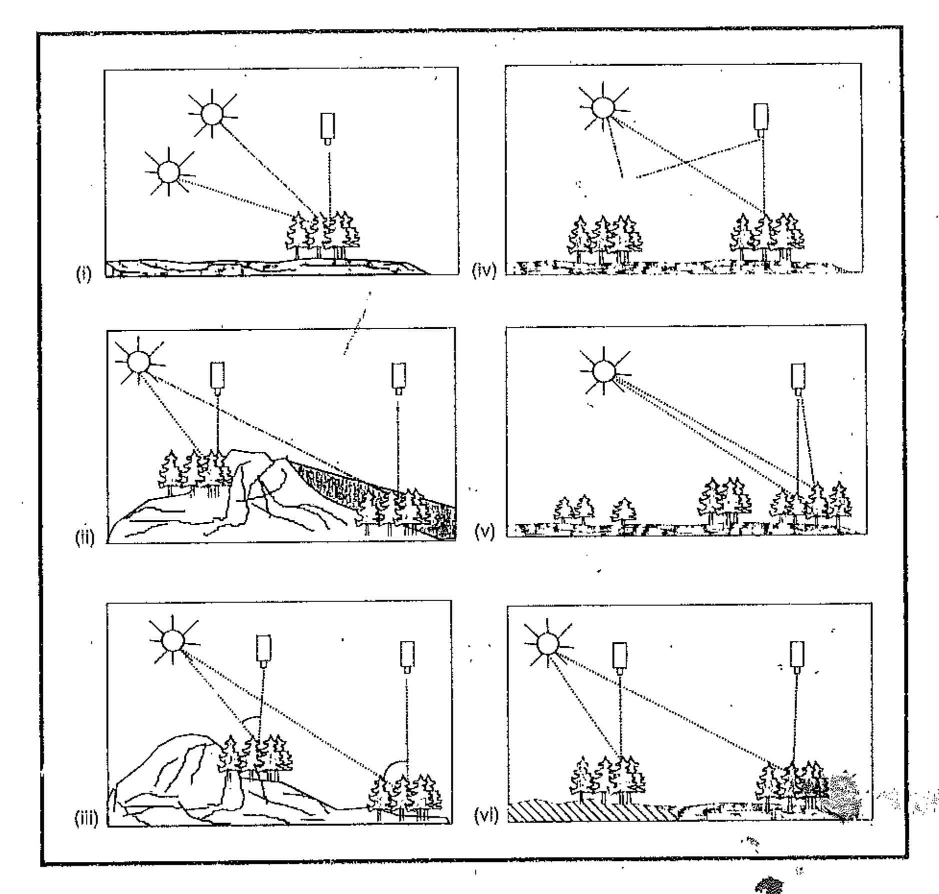


Fig. 2.10.- Factores que modifican la signatura espectral: (i) variaciones estacionales de la altura solar; (ii) orientación; (iii) pendiente; (iv) condiciones atmosféricas; (v) condición fenológica, (vi) sustrato edáfico.

indicados, que modifican esa signatura característica. En suma, las distintas cubiertas de la superficie terrestre no tienen un comportamiento espectral único y permanente, que coincida con sus curvas de reflectividad espectral y permita reconocerlas sin confusión frente a otras superficies. Por el contrario, en torno a un comportamiento tipo, que denominamos signatura espectral, cada cubierta presenta una cierta variabilidad espectral, debida a los factores ya comentados, y que dificulta —en última instancia— su discriminación de otras superficies.

Pese a estos comentarios, no cabe duda que las curvas de reflectividad arriba analizadas son muy útiles para interpretar más fielmente la imagen, por cuanto relacionan los valores adquiridos por el sensor con las medidas de laboratorio. A la vez, estas gráficas nos permiten seleccionar las bandas más convenientes para la detección de las cubiertas terrestres bajo estudio.

A continuación, se analizan con mayor detalle los factores que explican este comportamiento espectral teórico para el caso de los tres elementos fundamentales del paisaje: vegetación, suelo y agua.

2.5.2. Comportamiento espectral de la vegetación en el espectro óptico

La caracterización espectral de las masas vegetales constituye una de las tareas más interesantes en teledetección. Pese a su gran importancia, aún ofrece notables dificultades como consecuencia de los múltiples factores que influyen en la radiancia final detectada por el sensor. En primera instancia, ha de considerarse la propia reflectividad de la hoja, en función de su estado fenológico, forma y contenido de humedad. Además es preciso tener en cuenta las características morfológicas de la planta: su altura, perfil, grado de cobertura del suelo, etc., que provocan una notable modificación de su comportamiento reflectivo. Un tercer grupo de factores serían los derivados de la situación geográfica de la planta: pendiente, orientación, asociación con otras especies, geometría de plantación, etc.

A pesar de las variaciones que introducen estos factores, vamos aquí a detenernos en el comportamiento espectral de la vegetación vigorosa. Para ello, contamos con varios estudios teóricos (Gates et al., 1965; Knipling, 1970; Colwell, 1974; Curran, 1980; Jensen, 1983; Lusch, 1989), y con una serie de curvas espectrales obtenidas en mediciones de laboratorio (fig. 2.8 y 2.11).

De acuerdo a estos trabajos, el comportamiento típico de la vegetación vigorosa muestra una reducida reflectividad en las bandas visibles, con un máximo relativo en la porción verde del espectro (en torno a 0,55 µm). Por el contrario, en el infrarrojo cercano presenta una elevada reflectividad, reduciéndose paulatinamente hacia el infrarrojo medio.

Estas características espectrales se relacionan, primordialmente, con la acción de los pigmentos foto-sintéticos y del agua que almacenan las hojas. En concreto, la baja reflectividad en la porción visible del espectro se debe al efecto absorbente de los pigmentos de la hoja, principalmente las clorofilas, xantofila y caroteno (65, 29 y 6 %, respectivamente, aunque la proporción puede variar mucho: Gates et al., 1965). Todos ellos absorben en la banda del espectro situada en torno a los 0,445 µm, mientras la clorofila presenta una segunda banda de absorción en torno a los 0,645 µm. Entre ambas porciones del espectro, aparece una banda intermedia, alrededor de los 0,55 µm, en donde el efecto absorbente es menor. Por esta causa aparece un pico relativo de reflectividad que coincide con la banda verde del espectro visible, y causa el color con el que nuestro ojos perciben la vegetación vigorosa.

Cuando se aproxima la caída otoñal de las hojas, la clorofila ejerce una menor influencia, lo que explica su mayor reflectividad en la banda roja y, en

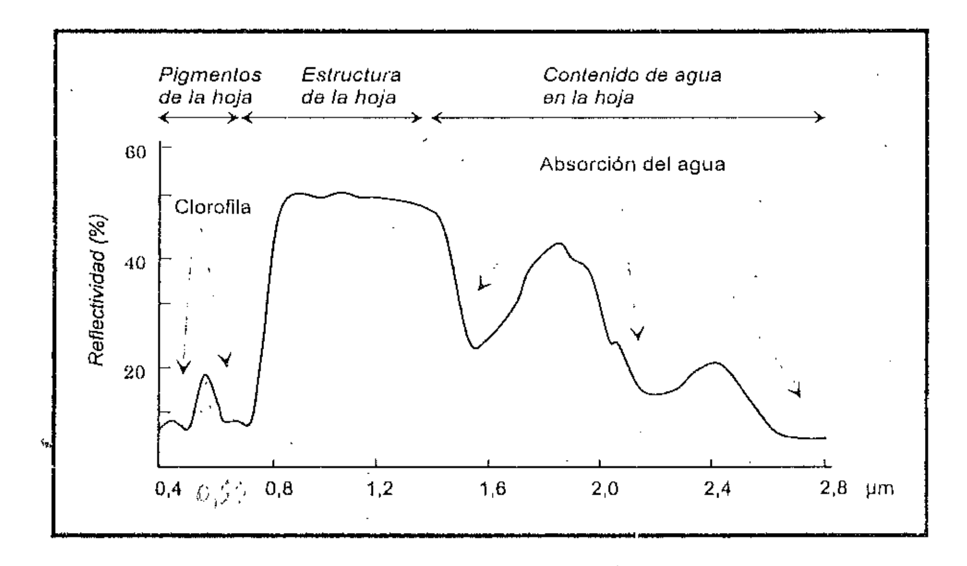


Fig. 2.11 - *Factores de la reflectividad de la vegetación sana en el espectro óptico*

definitiva, su color amarillento (verde + rojo). En algunas especies resulta destacada la acción de otro pigmento, la antocianina, buen reflector de la porción roja del espectro, que causa ese color en épocas de senescencia (caso de los arces canadienses o la lenga chilena).

En cuanto a la elevada reflectividad en el infrarrojo cercano, parece deberse a la estructura celular interna de la hoja. En concreto, ejerce un papel protagonista la capa esponjosa del mesófilo, con sus cavidades de aire internas, al difundir y dispersar la mayor parte de la radiación incidente en esta banda del espectro (Harris, 1987, pp. 17-20). Por ello, la hoja sana ofrece una alta reflectividad en el infrarrojo cercano, en claro contraste con la baja reflectividad que ofrece en el espectro visible, especialmente con la banda roja. Puesto que la estructura de la hoja es muy variada según las especies, esta banda también resulta idónea para discriminar entre plantas, incluso entre aquellas que no podrían separarse en el espectro visible.

A partir de 1,4 µm el efecto absorbente del agua es muy claro, por lo que la reflectividad de la vegetación sana se reduce drásticamente en el infrarrojo medio. Las medidas de laboratorio muestran una notable diferencia en esta región del espectro entre las hojas secas y las infiltradas con agua (Knipling, 1970; Curran, 1985), especialmente en las longitudes de onda próximas a 1,45 µm, 1,92 µm y 2,7 µm (Lusch, 1989). En experimentos con hojas de higuera, la reflectividad de la hoja seca alcanzó hasta cuatro veces el valor de la hoja húmeda, para la banda situada en torno a 1,9 µm (Short, 1982). En otros estudios sobre hojas de conífera, se observó un sensible aumento de la reflectividad en el infrarrojo medio según se iban desecando las hojas, disminuyendo ligeramente en el infrarrojo cercano y con escasa

variación en el visible (Westman y Price, 1988). Entre estas bandas, donde la absorción del agua es más clara, se sitúan dos picos relativos de reflectividad, en torno a 1,6 µm y 2,2 µm. Queda patente, pues, que la observación en esta región del espectro es de gran interés para conocer el estado hídrico de la hoja.

Las curvas de reflectividad aquí presentadas pueden modificarse en función de la morfología de la hoja. Así, las hojas aciculares tienden a una mayor absortividad en todas las longitudes de onda, mientras las plantas desérticas, de tronco suculento, reflejan una mayor radiación que otras especies mesofíticas (Gates et al., 1965).

Obviamente el sensor no mide hojas aisladas, sino agrupaciones de hojas formando masas de vegetación, por lo que intervienen otros elementos adicionales que complican el esquema previo. Algunos de ellos son: el ángulo de elevación solar, directamente relacionado con la proporción de sombras que detecta el sensor; el índice de área foliar (LAI), especialmente sensible cuando la vegetación no cubre totalmente el suelo; las características del suelo que sustenta la vegetación; la geometría de la cubierta vegetal; su estado fenológico, etc.

Pese a la complejidad final, es evidente que estas ideas nos sirven para centrar el estudio científico de la vegetación a partir de sensores espaciales. De ellas, resulta evidente que el contraste más nítido en la reflectividad espectral de la vegetación sana se produce entre las bandas visibles, especialmente el rojo (en torno a 0,645 µm), y el infrarrojo cercano (0,7 a 1,3 µm). De ahí que podemos enunciar, como principio genérico, que cuanto mayor sea el contraste entre esas bandas, mayor será el vigor de la vegetación, y más clara su discriminación frente a otros tipos de cubierta. Este comportamiento espectral teórico de las cubiertas vegetales ha sido la base para obtener una serie de índices de vegetación, que se basan —entre otros factores— en el contraste entre las bandas roja e infrarrojo cercano del espectro. Se construyen a partir de la combinación entre estas dos bandas, cuando disponemos de una imagen multi-espectral. Muy variados en su desarrollo, todos ellos tienden a presentar de forma más nítida las características de la vegetación, facilitando su aislamiento de otras cubiertas y la detección de su estado vital (Meliá et al., 1986; Meliá, 1986; Huete, 1987; Sellers, 1989). Más adelante se estudiará el interés temático de estas transformaciones (7.1.2).

Queda implícito que cualquier fuente de estrés en la vegetación se mostrará en un comportamiento espectral más o menos alejado del anteriormente expuesto. La hoja senescente o enferma tiende a perder actividad clorofílica y, en consecuencia, a ofrecer una menor absortividad en las bandas azul y roja del espectro visible. El aumento consecuente de la reflectividad en estas bandas elimina el máximo relativo antes situado en el verde, por lo que la hoja tiende a mostrar un color amarillento. Por el contrario, en el infrarrojo cercano se produce una reducción de la reflectividad, como consecuencia de un deterioro en la estructura celular de la hoja. La curva espectral, por tanto, se hace más plana, menos cromática (Murtha, 1978; Knipling, 1970).

Estas observaciones son válidas para detectar daños producidos por plagas o incendios forestales (Tanaka et al., 1983; Chuvieco y Congalton, 1988b). En varios estudios, se ha comprobado una clara relación entre el cociente infrarrojo medio/infrarrojo cercano y el contenido de humedad en la hojas, lo que permite determinar aquellas zonas afectadas por estrés hídrico (Cohen, 1991a; Vogelman, 1990; Hunt y Rock, 1989). Además, se ha comprobado que ciertos factores de estrés en la hoja están asociados a un desplazamiento en el límite del rojo (*red edge*) —esto es, en el cambio de pendiente de la curva espectral entre el rojo y el infrarrojo cercano—, hacia longitudes más cortas. Este fenómeno se ha observado cuando las plantas están afectadas por contaminación de metales pesados (Rock et al., 1986).

2.5.3. El suelo en el espectro óptico

Como consecuencia del efecto de pantalla provocado por la cubierta vegetal, no resulta sencillo obtener información del sustrato geológico a partir de sensores espaciales. Sin embargo, pueden obtenerse algunos datos indirectos sobre las características del suelo/litología gracias a las anomalías que puedan detectarse en esa cubierta vegetal. Ejemplos de este tipo de modificaciones son: distribución peculiar de especies, crecimiento o densidad irregular, alteraciones de la pigmentación o del ciclo fenológico, etc. Si bien no todos estos fenómenos pueden ser imputados al sustrato geológico, algunos estudios han demostrado la posibilidad de inferir valiosa información de éste a partir de la vegetación (Milton et al., 1983; Lulla, 1985). Esta técnica se ha bautizado con el nombre de geobotánica, demostrando gran interés para estudios regionales (Bruce y Hormsby, 1987).

En lo que atañe a los suelos desnudos, su comportamiento espectral es mucho más uniforme que el de la vegetación, mostrando una curva espectral bastante plana y de carácter ascendente (fig. 2.8). Los principales factores que intervienen en este caso son la composición química del suelo, su textura, estructura y contenido de humedad.

La composición química es la causa del color dominante con el que percibimos el suelo (fig. 2.12). Los de origen calcáreo tienden al color blanco, indicando una alta reflectividad en todas las bandas visibles. Por su parte, los suelos arcillosos ofrecen una mayor reflectividad en el rojo, como consecuencia de su alto contenido en óxido de hierro. El contenido de humus resulta muy influyente en su color, tendiendo a una baja reflectividad, especialmente en torno a 0,7 - 0,75 µm (Curran et al., 1990).

Respecto a las características físicas del suelo, puede afirmarse, en términos generales, que la reflectividad espectral resulta tanto mayor cuanto se trate de suelos más finos y apelmazados (Lusch, 1989).

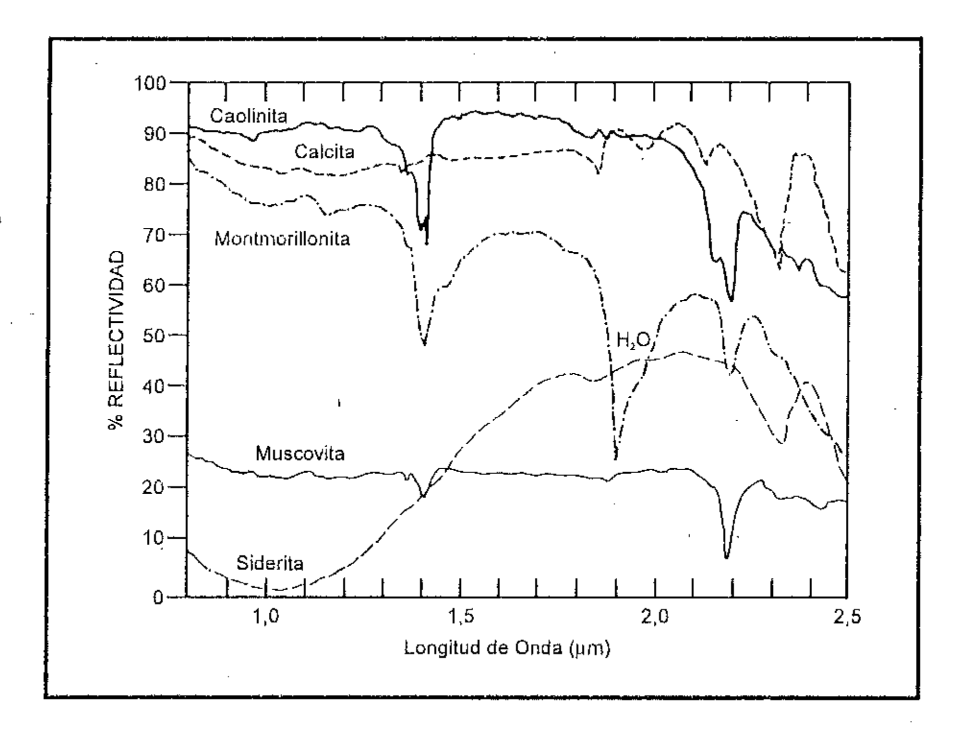


Fig. 2.12 - *Espectros de laboratorio para distintos minerales (adaptado de Elachi, 1987)*

El contenido de humedad es uno de los elementos más destacados en la reflectividad del suelo para estas longitudes de onda, como consecuencia de la alta absortividad del agua en estas bandas. Influye inversamente en la reflectividad del visible e infrarrojo, en torno a 1,45 µm y 1,92 µm, con mayor intensidad en las bandas de absorción del agua.

Como es bien sabido, textura, estructura y contenido de humedad están altamente relacionados. Por ejemplo, un suelo arcilloso tiende a tener un alto contenido de humedad, fuerte estructura y fina textura, lo que supone una baja reflectividad. En contraste, un suelo arenoso tiende a tener una débil estructura y bajo contenido de humedad, por lo que presentará una reflectividad más elevada (Curran, 1985). A ello convendría añadir el efecto de la materia orgánica en el suelo, que tiende a oscurecerle, y, en consecuencia, a reducir su reflectividad.

2.5.4. El agua en el espectro óptico

Las superficies acuáticas absorben o transmiten la mayor parte de la radiación visible que reciben, siendo mayor su absortividad cuanto mayor sea la longitud

de onda. La curva espectral, por tanto, es similar a la del suelo, aunque de sentido contrario. La mayor reflectividad del agua clara se produce en el azul, reduciéndose paulatinamente hacia el infrarrojo cercano y medio, donde ya es prácticamente nula. Por esta razón, la frontera tierra-agua es muy nítida en esta banda.

La variabilidad del agua es más fácilmente detectable en las longitudes de onda más cortas (azul y verde), y se relaciona con su profundidad, contenido de materiales en suspensión (clorofila, arcillas y nutrientes), y rugosidad de la superficie. La turbidez del agua, relacionada con su contenido de sedimentos, implica aumento de la reflectividad en todas las bandas del visible, para distintos diámetros de partícula (Bhargara y Mariam, 1991).

La profundidad del agua influye directamente en el aporte de reflectividad derivado de los materiales de los fondos. En aguas poco profundas la reflectividad aumenta, ya que se mezcla en el flujo recibido la reflectividad de los fondos. En consecuencia, la absortividad será tanto mayor cuanto más profunda sea la capa de agua. A partir de esta relación pueden abordarse algunos estudios de batimetría en zonas costeras. Para imágenes Landsat-TM se estima que la profundidad de agua máxima que puede determinarse alcanza 6,4 m en la banda azul, 3 en la verde y 2,1 en la roja (Ji et al., 1992).

En cuanto a su composición, diversos estudios han demostrado la posibilidad de emplear sensores espaciales para cartografiar contenido de clorofila en el agua (López y Caselles, 1989). Si el agua ofrece importantes concentraciones de clorofila, la reflectividad en el azul tiende a descender, aumentando en el verde. Esto permite establecer una clara correlación, de signo negativo, entre la reflectividad del agua en la banda azul y el contenido de clorofila (fig. 2.13), lo que facilita localizar concentraciones de algas (Robinson, 1985) o estudiar procesos de eutrofización en embalses (Verdin, 1985).

El resto de los materiales en suspensión contribuyen también a aumentar la reflectividad, además de presentar una mayor turbidez. Por último, la rugosidad de la superficie favorece la reflexión difusa, y en consecuencia una mayor reflectividad. En caso de aguas muy tranquilas, la superficie se comporta de modo especular, con valores de reflectividad muy variados en función de la localización del sensor. En el caso de las medidas tomadas con sensores espaciales, los valores resultan extremadamente bajos.

La nieve, por su parte, ofrece un comportamiento muy distante del agua. Presenta una reflectividad elevada en las bandas visibles, reduciéndose en el infrarrojo cercano y más claramente en el medio. Los factores más destacados en la reflectividad de la nieve son el tamaño del grano, la profundidad y densidad de la capa y la cantidad de impurezas que contenga (Dozier, 1989). La reflectividad es mayor para la nieve fresca que para la helada, mostrando los valores más bajos la

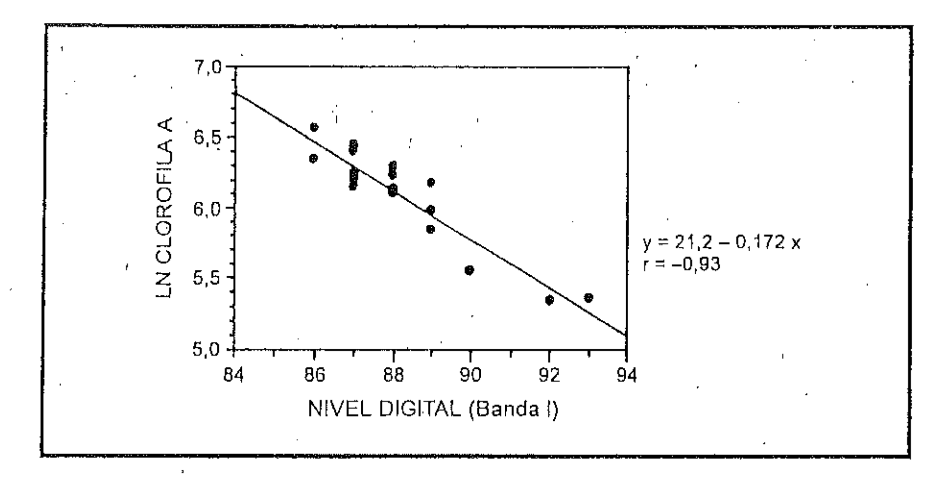


Fig. 2.13 - *Relación entre contenido de clorofila en el agua y valores adquiridos por el sensor TM (López y Caselles, 1989. Reproducida con permiso de la International Journal of Remote Sensing)*

nieve sucia (fig. 2.14). La reducción puede llegar hasta el 80 % para las bandas visibles (Hall y Martinec, 1985; Hall, 1988).

A veces no resulta sencillo distinguir la nieve de las nubes en el espectro visible. La distinción resulta más evidente en el infrarrojo medio, ya que las gotas o cristales de hielo de las nubes son más pequeñas que los granos de nieve, por lo que absorben menos radiación en esta banda del espectro. Además, habitualmente, la nieve tiene mayor reflectividad que las nubes en el visible y una textura más homogénea (Dozier, 1989).

2.6. El dominio del infrarrojo térmico

2.6.1. Características de la radiación energética en el infrarrojo térmico

De acuerdo con las leyes de Planck [2.4] y Wien [2.6], podemos fijar entre 8 y 14 μm la banda espectral en donde se manifiesta con mayor claridad la emitancia espectral de la superficie terrestre, de acuerdo a su temperatura (unos 300 K). A esta parte del espectro se le denomina infrarrojo térmico, puesto que nos permite detectar el calor que procede de las distintas cubiertas. En definitiva, la radiancia espectral que recibe el sensor no es el resultado de la reflexión de la energía solar sobre la superficie terrestre, sino de la radiación emitida por ésta.

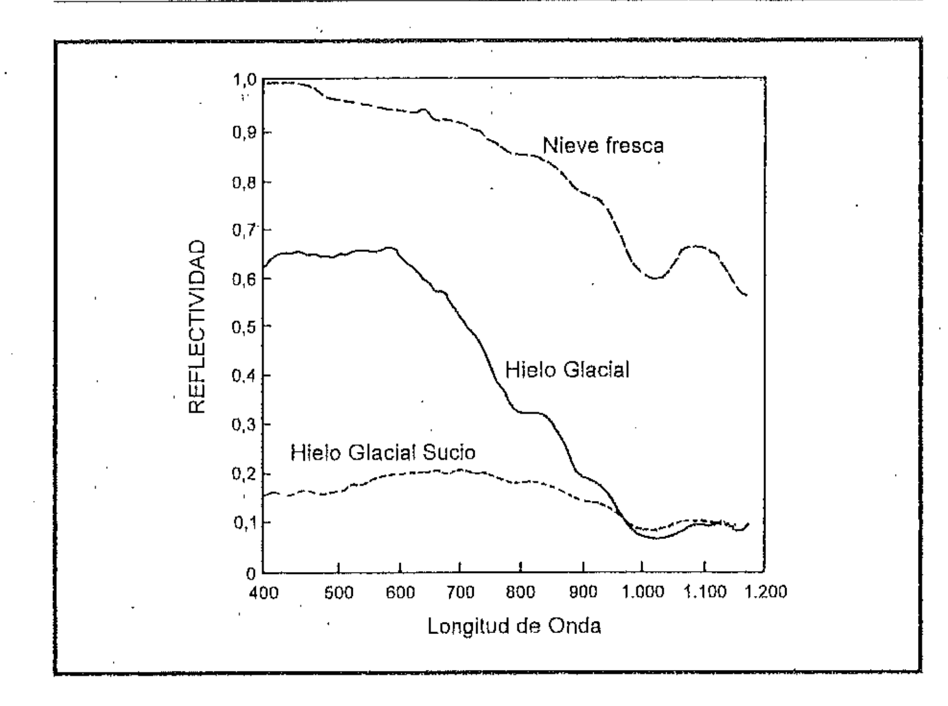


Fig. 2.14 - *Reflectividad característica para distintos tipos de nieve (adaptado de Hall y Martinec, 1985)*

Como ya se vio más arriba [2.7], la emitancia espectral de un objeto está directamente relacionada con su temperatura absoluta. A la vez, ésta se relaciona con su capacidad para absorber la radiación solar incidente. De la fórmula [2.11] se deduce que ésta puede ser reflejada, absorbida o transmitida. Considerando que la transmisividad es prácticamente nula en el infrarrojo térmico, la expresión puede simplificarse indicando que, a esas longitudes de onda, la energía incidente o bien se refleja o bien se absorbe. Junto a ello, es preciso tener en cuenta que la emisividad espectral de un objeto es equivalente a su absortividad (ley de Kirchoff). En otras palabras, a mayor absorción, mayor emisión, por lo que podemos expresar la fórmula [2.11] indicando:

$$1 = \rho + \varepsilon \qquad [2.13]$$

lo que, en resumen, significa que las superficies con alta reflectividad (caso de la nieve) son poco emisivas, mientras las poco reflectivas son altamente emisivas (como ocurre con el agua).

Como ya vimos anteriormente, la emisividad de un tipo de cubierta es una medida relativa, que pone en relación su emitancia con la de un cuerpo negro. Una alta emisividad (cercana a 1) indica que un objeto absorbe y radia una gran proporción de la energía incidente, mientras una emisividad considerablemente inferior a 1,

refiere a un objeto que absorbe y radia una pequeña proporción de la energía incidente. En el caso de las cubiertas de interés medio ambiental, la mayor emisividad, se presenta en la vegetación densa (0,99) y el agua (0,98), mientras los valores más bajos corresponden a los suelos arenosos (0,90), nieve (0,80) y metales (0,16). El contenido de humedad modifica notablemente estos valores. Así en suelos arenosos se han medido incrementos de emisividad de 0,90 a 0,94 al aumentar un 8 % el contenido de humedad (Mulders, 1987). Los valores de emisividad se calculan para una temperatura media, en este caso en torno a 20° C (Curran, 1985).

A partir de la medida de la emisividad puede estimarse la emitancia global de un objeto, conociendo su temperatura. En este sentido puede corregirse la ley de Stefan-Boltzmann, introduciendo el parámetro de emisividad:

$$M_n = \varepsilon \sigma T^4 \qquad [2.14]$$

Esto implica que dos objetos situados a la misma temperatura pueden presentar emitancias radiantes distintas. De esta forma, parece evidente la necesidad de corregir los valores de radiancia adquiridos por el sensor considerando la emisividad, que puede estimarse siempre y cuando se conozca la cubierta detectada y ésta sea suficientemente homogénea. En caso de un área con cubiertas muy distintas, cada una de ellas con su propia emisividad, el problema sería mucho más complejo. Habría de hacerse una corrección en función de las coberturas presentes en esa zona, conociendo la emisividad propia de cada una de ellas. En ocasiones se ha utilizado un mapa de ocupación del suelo previo para facilitar la corrección de emisividades (Caselles et al., 1984), aunque también puede basarse en una correlación de radiancias-temperaturas con medidas tomadas en el terreno o en estaciones meteorológicas (Caselles et al., 1983). Recientes trabajos han mostrado que, en cubiertas vegetales suficientemente densas, basta incorporar la emisividad de ésta y no la del suelo que la soporta, lo cual simplifica notablemente los cálculos. Más adelante, veremos con detalle los procedimientos para proceder al cálculo de la temperatura a partir de imágenes adquiridas en esta región del espectro (7.1.2.2).

Además de la emisividad, el comportamiento térmico de un objeto está relacionado con otros parámetros. Los más importantes son su capacidad térmica, conductividad, difusividad, inercia térmica e índice de calentamiento.

La capacidad térmica (C) indica la capacidad de la cubierta para almacenar calor. La capacidad térmica por unidad de masa se denomina calor específico (c). Las masas de agua poseen la mayor capacidad térmica, por lo que pueden almacenar más calor que la vegetación o los suelos.

La conductividad térmica (k), mide el ritmo al que se transmite el calor en esa cubierta. Las áreas urbanas son buenas conductoras de calor, mientras la vegetación o suelos resisten más esta transferencia. Por ello, la temperatura diurna

en zonas de cubierta vegetal es fundamentalmente una función de la temperatura de la capa superior, y no de capas inferiores.

La difusividad térmica (K) es una medida del cambio de temperatura que se produce en el interior de la cubierta. En general, las superficies secas difunden los cambios de temperatura hacia abajo a una velocidad menor que las superficies húmedas.

Por último, la inercia térmica (P) hace referencia a la resistencia de un material a cambiar de temperatura. Este parámetro está directamente relacionado con la conductividad (k), el calor específico (c) y la densidad del material (D), de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$P = \sqrt{Dck} \qquad [2.15]$$

Los suelos secos y arenosos, con baja inercia térmica, ofrecen severos contrastes entre las temperaturas diurnas y nocturnas. En contraste, los suelos húmedos y arcillosos son mucho más resistentes al cambio y presentarán temperaturas diurnas inferiores y nocturnas superiores a los suelos secos (fig. 2.15). La inercia térmica es más fácilmente detectable en los momentos de máxima y mínima insolación, aproximadamente a las 12 y 24 h, respectivamente.

En cuanto al índice de calentamiento, es función de la intensidad de la radiación y de la absortividad del objeto. La intensidad es menor en aquellas zonas arboladas, con nubes o con edificios que impidan la radiación directa. También está afectado directamente por la pendiente o exposición de las laderas.

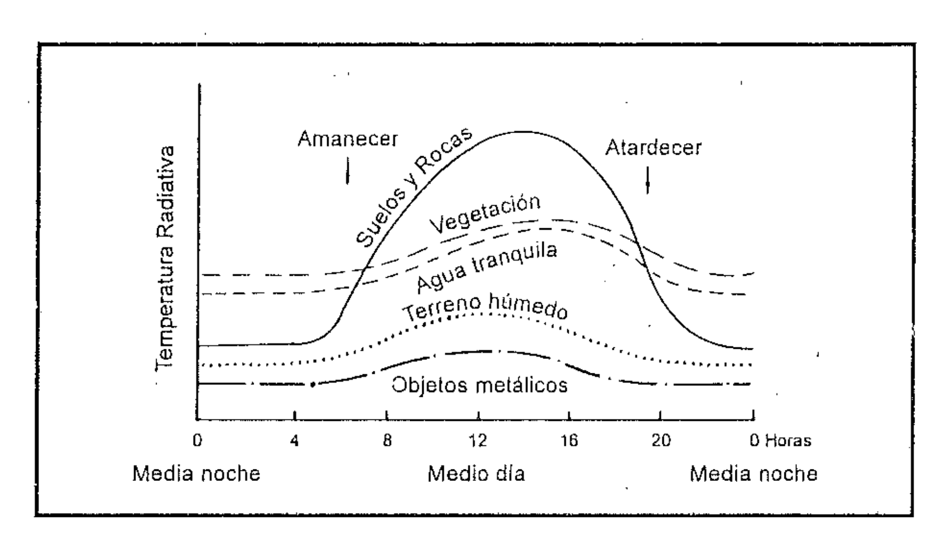


Fig. 2.15 - *Inercia térmica estimada para diversas cubiertas (adaptado de Short, 1982)*

2.6.2. Comportamiento espectral de la vegetación en el infrarrojo térmico

Las propiedades térmicas de la vegetación son bastante complejas, puesto que absorbe una gran cantidad de la energía solar que recibe para realizar la función clorofílica. Esta energía es re-emitida durante la noche para mantener el balance energético. Por esta razón, la temperatura media de las masas vegetales es más baja que el aire circundante a lo largo del día y más alta durante la noche.

La inercia térmica de la vegetación es alta, gracias a su importante contenido de humedad, que supone un elemento básico para la vida de las plantas. Precisamente, desde el punto de vista térmico uno de los procesos más destacados en la señal ofrecida por la vegetación es el que regula su ciclo hídrico. La evapo-transpiración supone una liberación de calor para realizar el tránsito del agua almacenada en las hojas al estado gaseoso. Este proceso supone una reducción de la temperatura, por lo que las plantas tienden a estar más frías durante el día que su entorno. Por el contrario, durante la noche se re-emite la energía recogida de día, a la longitud de onda del térmico, lo que explica que ofrezca una mayor temperatura que las áreas limítrofes. Esta variación térmica, permite detectar estrés hídrico en la vegetación a partir de la información registrada en el infrarrojo térmico. Aunque la mayor parte de los estudios que siguen el estado de la vegetación se basan en el espectro óptico (Kerr et al., 1989; Kogan, 1990; Cihlar et al., 1991), en los últimos años se están considerando también imágenes térmicas, que permiten determinar modificaciones en la cubierta vegetal, producidas por procesos de deforestación, desertización, o estrés hídrico (Walsh, 1987; Running et al., 1989; Seguin et al., 1989).

Dentro del comportamiento térmico más usual de la vegetación, también es preciso considerar algunos factores externos a las propias condiciones de la planta. Por ejemplo, la evapo-transpiración está influida por la humedad atmosférica, velocidad del viento, disponibilidad de luz, temperatura del aire y humedad del suelo. La humedad atmosférica reduce la evapo-transpiración, mientras el resto de los factores la aumentan.

Otro elemento importante que afecta a la emisividad de la vegetación es su extensión y densidad. Las grandes superficies verdes producen una elevada radiación, que puede ser incluso 30 veces superior a la correspondiente a los suelos vecinos (Curran, 1985).

2.6.3. Los suelos y el agua en el dominio térmico

Respecto a los suelos, el contenido de humedad es el factor más destacado de su conducta térmica. A mayor humedad, el suelo presentará una mayor

inercia térmica, puesto que aumenta su calor específico y conductividad. Esto le lleva a presentarse más frío durante el día y más cálido durante la noche que los suelos secos.

Otros parámetros a considerar serían la densidad, calor específico y conductividad. Diversos estudios de laboratorio han mostrado cómo el cuarzo presenta una densidad y calor específico similar a la arcilla, pero ofrece valores de conductividad mucho más elevados. Por ello, su inercia térmica es mayor, a la vez que cuenta con bajos valores de emisividad (0,90). Los suelos con alto contenido de materia orgánica ofrecen los valores más bajos de conductividad, por lo que tienden a mostrar más nítidamente las diferencias de temperatura entre el día y la noche.

De los párrafos anteriores, se deduce fácilmente que el agua posee la mayor inercia térmica. Esta resistencia a cambiar de temperatura es debida a su alta conductividad: la radiación incidente es fuertemente absorbida y transmitida a lo largo de la superficie por movimientos de convección, con lo que resulta más difícil que cambie de temperatura. Esto permite detectar con bastante facilidad plumas de agua provenientes de fuentes ajenas al entorno, como sería agua con materiales en suspensión (fig. 2.16*) o descargas de centrales nucleares. Asimismo, cartografiar la temperatura de la superficie marina resulta de gran interés para el estudio global del clima, tanto en lo que se refiere a tendencias promedio (calentamiento de algunas zonas), como a movimientos particulares de las corrientes oceánicas. También, resulta de gran ayuda para detectar bancos de pesca (Tameishi, 1991).

En el caso de la nieve, la temperatura, tamaño del cristal y contenido de agua líquida afectan a la medida de su temperatura radiante. Como ya vimos, esta cubierta ofrece la emisividad más baja (o si se prefiere la mayor reflectividad), por lo que tiende a registrar más bajas temperaturas que el entorno. La observación de la nieve en el térmico es de gran ayuda para diferenciar tipos y estudiar la dinámica de su cobertura, de cara a estimar volumen de agua almacenada (Ferris y Congalton, 1989).

2.7. La región de las micro-ondas

2.7.1. Características de la radiación energética en la región de las micro-ondas

La banda del espectro que se inicia en las longitudes de onda milimétricas se denomina región de las micro-ondas. Se trata de las longitudes mayores utiliza-

das en teledetección, si bien cuentan asimismo con otras aplicaciones civiles y militares.

La observación en esta banda del espectro es complementaria y más compleja que la realizada en las bandas ópticas, por lo que el rango de aplicaciones es todavía inferior al registrado en éstas, si bien está aumentando notablemente en los últimos años, gracias a la creciente disponibilidad de satélites equipados con equipos de micro-ondas (ERS, Radarsat, JERS, Almaz, etc.). La virtud fundamental de esta región del espectro es ser prácticamente transparente a la influencia atmosférica, ya que se trabaja a longitudes de onda muy superiores al tamaño habitual de las gotas de agua (0,1 mm). Esta propiedad hace idóneo el trabajo en esta región del espectro, especialmente para recoger información de aquellas zonas del planeta donde la cubierta de nubes es muy frecuente, como ocurre en las zonas tropicales o polares. Por ejemplo, el radar lateral aero-transportado (SLAR), permitió completar la primera cartografía de la cuenca del Amazonas y de varios países de Centro-América, detectando recursos hídricos y mineros antes desconocidos.

La observación remota en esta banda puede dividirse en pasiva y activa. La primera, parte de similares principios a los empleados en otras regiones del espectro: el sensor se limita a recoger la energía que procede de las cubiertas situadas en la superficie terrestre. Por el contrario, los sensores activos no sólo recogen sino que también emiten su propio flujo de energía, controlándose, en función del tipo de aplicación, las características de emisión y recepción de dicho flujo. Esto permite una gran versatilidad a la teledetección de micro-ondas, ya que en función de los objetivos pueden diseñarse sensores orientados a recoger información de ciertas variables de interés.

Los sensores pasivos en esta banda se denominan radiómetros de micro-ondas. Son poco utilizados en teledetección, puesto que la emitancia de los objetos es difícilmente perceptible en esta banda. Para las longitudes de onda que comprende, se emplea la aproximación de la ley de Planck calculada por Rayleigh-Jeans (Elachi, 1987):

$$M_{n,\lambda} = \frac{2\pi kT}{\lambda^4} \qquad [2.16]$$

donde $M_{n\lambda}$ corresponde a la emitancia espectral, T a la temperatura en Kelvin, y λ a la longitud de onda. Las constantes tienen el mismo significado que en [2.4]. En esta región, los valores de M_λ son muy bajos, y existen frecuentes interferencias entre señales emitidas, reflejadas y transmitidas. Por ello, no es una técnica muy difundida en teledetección espacial, aunque se ha mostrado de gran interés para el estudio de capas de hielo y nieve. La cartografía de la Antártida a partir del radiómetro ESMR del satélite Nimbus-5 (Hall y Martinec, 1985, pp.

141-149), resulta muy significativa a este respecto. Otros autores han propuesto estimar el grosor de la cobertura de nieve a partir de las diferencias de temperaturas entre dos canales de micro-ondas detectados por el mismo sensor (Chang et al., 1990).

Pese al interés de estas experiencias, los sensores más importantes en este campo son los activos, que emiten su propio haz de micro-ondas para recoger posteriormente su reflexión sobre la superficie terrestre. Normalmente se conocen con el nombre de radar (*Radio Detection and Ranging*). Por tratarse de un haz emitido artificialmente, pueden controlarse las condiciones de adquisición: ángulo, distancia, orientación, polarización, etc. Esto facilita la interpretación posterior de la señal, si bien es una tarea compleja ante la gran cantidad de factores que intervienen en el proceso.

Al igual que en la observación en el espectro óptico, en esta región también podemos distinguir una serie de bandas de características comunes. Siguiendo una terminología extraída, en buena parte, de las aplicaciones militares que dieron origen al radar, suelen distinguirse las bandas de micro-ondas que aparecen en la tabla 2.2.

Cuando se emite un haz de micro-ondas desde un radar a la superficie terrestre, la mayor parte de ese haz es dispersado al contacto con ella. Según la naturaleza del sustrato, el haz principalmente se dispersa hacia la atmósfera (caso del suelo), se dispersa dentro del propio objeto (caso de la vegetación), o se refleja especularmente (caso del agua). En función de estos tres comportamientos el radar registrará una señal de retorno muy distinta (fig. 2.17).

Desgraciadamente, como ocurre en otras bandas del espectro, tampoco aquí cada cubierta ofrece un comportamiento único y constante. Otros factores, que podríamos denominar medio ambientales, influyen en la señal finalmente

Denominación	Anchura (cm)		Valor típico	Anchura (GHz)	
Ka	0,75	1,10	1,0	10,90	36
K	1,10	1,67			
Ku	1,67	2,40			
X	2,40	3,75	3,0	5,75	10,90
C	3,75	7,50	5,6	3,90	5,75
S	7,50	15,00	10,0	1,55	3,90
L	15,00	30,00	23,0	0,39	1,55
P	30,00	100,00	70,0	> 0,39	

Tabla. 2.2 - *Bandas de frecuencia habitualmente utilizadas en equipos radar*

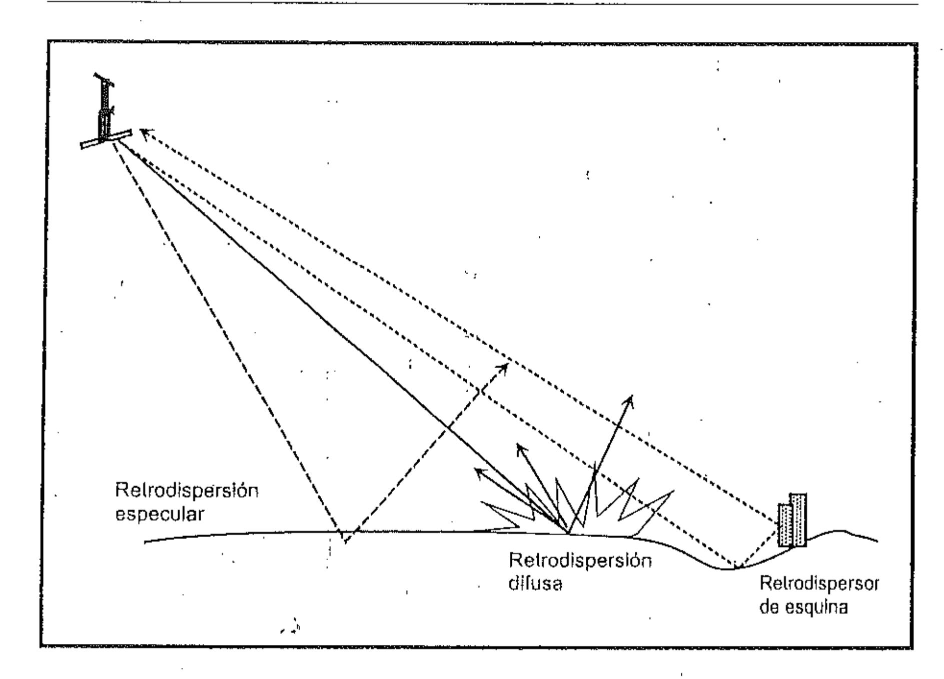


Fig. 2.17 - *Distintos tipos de retro-dispersión (adaptado de Campbell, 1987)*

detectada por el sensor. Entre ellos, los más importantes son: la rugosidad y geometría del terreno, el ángulo de incidencia del flujo y su polarización. Estos factores introducen una cierta variabilidad en torno al coeficiente promedio de cada tipo de cubierta, principalmente afectado por su conductividad o constante dieléctrica. Con estos elementos, podemos abordar la ecuación fundamental del radar:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 r^4} \qquad [2.17]$$

donde P_r, indica la potencia retro-dispersada; P_t, la potencia emitida por el radar, G es un factor de ganancia de la antena; r, indica la distancia entre el sensor y la cubierta, y σ la sección eficaz de retro-dispersión.

Precisamente este último factor, σ, es el que implica una mayor complejidad, puesto que depende de diversos factores. Entre los más importantes se cuentan: la rugosidad del material y sus condiciones dieléctricas, y las condiciones del terreno, principalmente pendiente y orientación frente al flujo emitido.

En cuanto a la rugosidad, parece comprobado que incide directamente en la intensidad de la señal de retorno, siendo ésta mayor cuando más elevada es la rugosidad. Conviene recordar, sin embargo, que el concepto de rugosidad no sólo depende de la estructura de la superficie, sino también de la longitud de onda de la observación. En longitudes cortas una superficie relativamente llana puede aparecer como rugosa, mientras se comporta como lisa en longitudes mayores (fig. 2.18). Esta relación se concreta gracias al criterio de Rayleigh, que considera una cubierta como rugosa si:

$$s_h \geq \frac{\lambda}{8} \cos\theta \qquad [2.18]$$

donde s_h es la desviación típica de la altura de la superficie; λ la longitud de onda de observación, y θ el ángulo de incidencia. En pocas palabras, esto indica que a igual rugosidad del terreno, éste aparecerá tanto más liso cuanto se trabaje a longitudes de onda mayores, y/o con ángulos de incidencia mayores (esto es, en una observación más oblicua). Esta relación es muy importante, ya que en una superficie que aparece como rugosa, la dispersión de retorno se dirige en todas las direcciones y el sensor capta una fuerte señal. En cambio, si la cubierta aparece lisa la reflexión tiende a ser especular y la señal de retorno puede llegar a ser prácticamente nula. Este es el caso de las masas de agua en calma, que aparecen con tonos oscuros en una imagen radar (fig. 2.19).

Por otra parte, las características eléctricas de la cubierta juegan un papel tan destacado como la geometría de observación en la señal retornada al sensor. Una de las medidas de este comportamiento es la denominada constante dieléctrica compleja, que intenta medir la conductividad y reflectividad de un tipo de material. En términos generales, los materiales secos ofrecen una constante dieléctrica entre 3 y 8, mientras el agua ofrece un valor de 80. En consecuencia, la presencia de agua en el suelo o la vegetación puede alterar significativamente el pulso de retorno. Por esa razón, la vegetación —casi siempre cargada de humedad— tiende a ofrecer un pulso de retorno mayor que los suelos secos. También son buenos conductores las superficies metálicas, que ofrecen valores de retro-dispersión bastante elevados.

Junto a la rugosidad, conviene asimismo considerar la geometría del terreno: pendientes y orientaciones al ángulo de incidencia del radar. En el caso de zonas urbanas, resulta muy frecuente obtener señales de retorno particularmente intensas, debido a la presencia de los denominados reflectores de esquina, que cambian la trayectoria de la señal incidente retornándola en la misma dirección de origen.

También resulta muy destacado el efecto del ángulo de incidencia sobre el coeficiente de retro-dispersión. Como ya hemos dicho, a mayor ángulo, en general menor pulso de retorno, puesto que la rugosidad y, en consecuencia, la

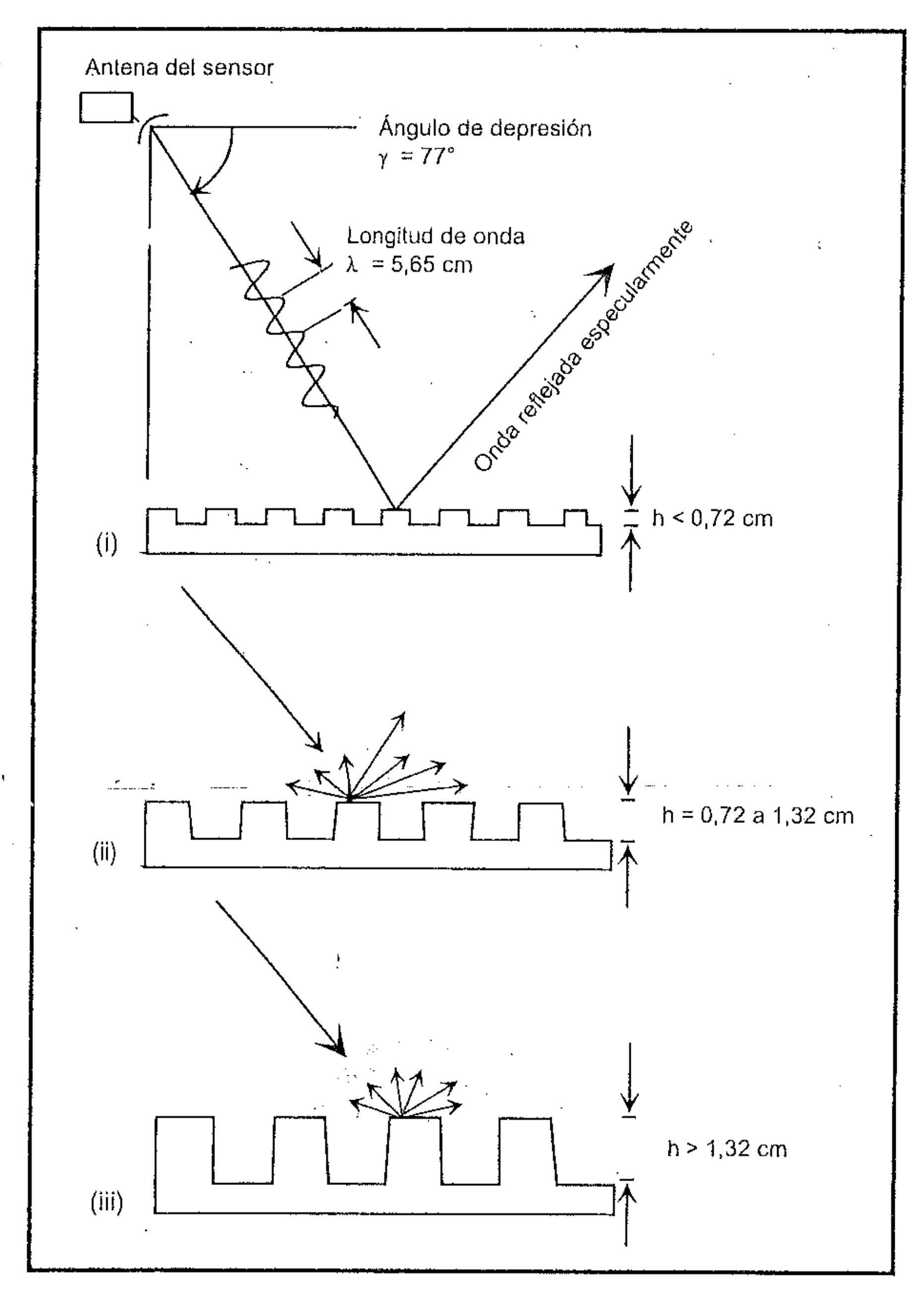


Fig. 2.18 - *Rugosidad del terreno en función de su variación en altura: (i) superficie suave, no hay retorno; (ii) superficie moderadamente rugosa, retorno medio; (iii) superficie rugosa, retorno intenso (adaptado de Lillesand y Kiefer, 1994)*



Fig. 2.19 - *Imagen adquirida por el SAR del ERS-1 el 14 de julio de 1993 que muestra las inundaciones del río Mississippi próximo a la ciudad de San Louis. El agua presenta la señal de retorno más baja. Cortesía Euroimage (ESA, 1993)*

dispersión, es menor. Además, si se combina un ángulo de incidencia bajo con una longitud de onda larga, el pulso del radar puede penetrar a una cierta profundidad, consiguiéndose interesante información sobre fondos de vegetación o suelos. Conviene tener en cuenta que el ángulo de incidencia cambia en la dirección perpendicular a la trayectoria del avión o satélite; en definitiva, no es constante para cada punto de la imagen, ya que la observación que realizan los equipos radar es lateral, como veremos en el capítulo 3. También del ángulo de incidencia depende la información morfológica que proporciona el radar. Con ángulos altos, el efecto de sombra se realza notablemente, aunque también lo hacen las deformaciones geométricas. Esta sombra es relativa a la orientación de la topografía frente a la antena, de ahí que si se varía el ángulo de incidencia pueden conseguirse efectos estereoscópicos. A partir de esa reconstrucción tri-dimensional se realza notablemente el estudio de la geología y geomorfología local (ver, más adelante, la fig. 3.29).

Por último, la polarización refiere a la forma en la cual son transmitidas y recibidas las señales del radar. Una señal polarizada indica que su vibración se restringe a una dirección determinada. Las dos formas más importantes son la polarización semejante, cuando la señal emitida y la recibida tienen la misma polarización (Horizontal-Horizontal o Vertical-Vertical), y la cruzada, cuando varía la polarización entre la señal emitida y la recibida (Horizontal-Vertical o Vertical-Horizontal). La dirección con que la señal está polarizada influye en el flujo de retorno, puesto que el eco del radar es selectivo a la dirección de propagación.

2.7.2. Características de la vegetación en la región de las micro-ondas

En lo que afecta a la vegetación, la rugosidad es un elemento fundamental en la señal de retorno. La rugosidad es muy dependiente del tamaño, forma, orientación y número de hojas. A partir de la observación en una sola banda resulta, en consecuencia, muy complicado distinguir tipos de vegetación. En varios proyectos de inventario forestal, se ha puesto en evidencia la dificultad para separar, por ejemplo, coníferas de caducifolias, tanto en banda L (Deane, 1980), como en banda S, X y C, como consecuencia de la gran variabilidad de coeficientes de retro-dispersión en coníferas (Leckie, 1990).

Respecto a la conductividad, la constante dieléctrica es bastante alta y constante para la mayor parte de las masas vegetales, incrementándose con el mayor contenido de humedad durante la época de crecimiento. Cuando la vegetación pierde vigor o el aporte del suelo es mayor, la constante dieléctrica disminuye drásticamente. De aquí se deduce que es posible obtener información sobre la humedad del sustrato vegetal, siempre y cuando se trabaje con ángulos de incidencia altos.

En una experiencia piloto para medir la humedad de una superficie de praderas, se observaron mejores ajustes trabajando en bandas cortas (banda X), y con ángulos de incidencia de 30°, con los que se logró un coeficiente de determinación (r^2) del 90 %. Para ángulos más bajos, hasta de 0°, sólo se consiguieron ajustes del 50 %. Un efecto similar, aunque con peores correlaciones, se observó en la banda C (Gogineni et al., 1991).

La profundidad de penetración en masas vegetales es dependiente de la longitud de onda a la que se trabaje, así como de las condiciones de humedad del sustrato y de la polarización. Resulta mayor a longitudes largas (banda L, en donde influye notablemente las condiciones del sustrato), y con señales de polarización semejante (HH o VV), mientras se reduce a longitudes cortas (banda X, más sensible a la geometría y orientación de las hojas) o con señales de polarización cruzada (HV o VH). De acuerdo a algunos autores, en la banda X puede estimarse la rugosidad de la vegetación, en la C la biomasa de la hoja y en la L la biomasa de la madera (Curran y Foody, 1994).

2.7.3. Características del suelo y el agua

De los párrafos anteriores se deduce que los suelos rugosos y secos tendrán un mayor coeficiente de retro-dispersión y, por tanto, aparecerán con tonos claros en las imágenes radar. Si la señal se reduce, manteniendo otras condiciones constantes, se tratará normalmente de suelos más húmedos. En suelos secos la capacidad de penetración del radar aumenta hasta llegar a varios metros si la longitud de onda es

suficientemente larga (fig. 2.20). Los núcleos de población, altamente rugosos a longitudes largas, también aparecen con tonos claros, lo que permite discriminarlos frente a los espacios cultivados limítrofes (Meliá y Sobrino, 1987).

En cuanto al agua, la región de las micro-ondas proporciona una cierta capacidad de penetración, siempre que el ángulo de incidencia sea bajo y se trabaje con longitudes de onda largas. El agua, casi siempre refleja especularmente el pulso recibido, con lo que el retorno es bastante bajo. Ahora bien, si existe una cierta rugosidad superficial, por ejemplo oleaje, puede manifestarse en la imagen radar, siempre que el ángulo de incidencia sea bajo (fig. 2.21*). Esta aplicación es muy útil para detectar anomalías en la superficie, por ejemplo las causadas por descargas incontroladas de petróleo (ver fig. 3.30). A partir de variaciones menores en la altura del oleaje, medido con altímetros de micro-ondas de elevada precisión, puede obtenerse información de los fondos oceánicos, y, a partir de la rugosidad superficial, los vectores de dirección y velocidad del viento (fig. 2.22).

Respecto al hielo y nieve, el pulso de retorno es muy dependiente de las condiciones del material. La edad, composición y compacidad de la capa de hielo, su rugosidad, geometría interna y temperatura son factores destacados en el coeficiente de retro-dispersión finalmente detectado por el sensor.

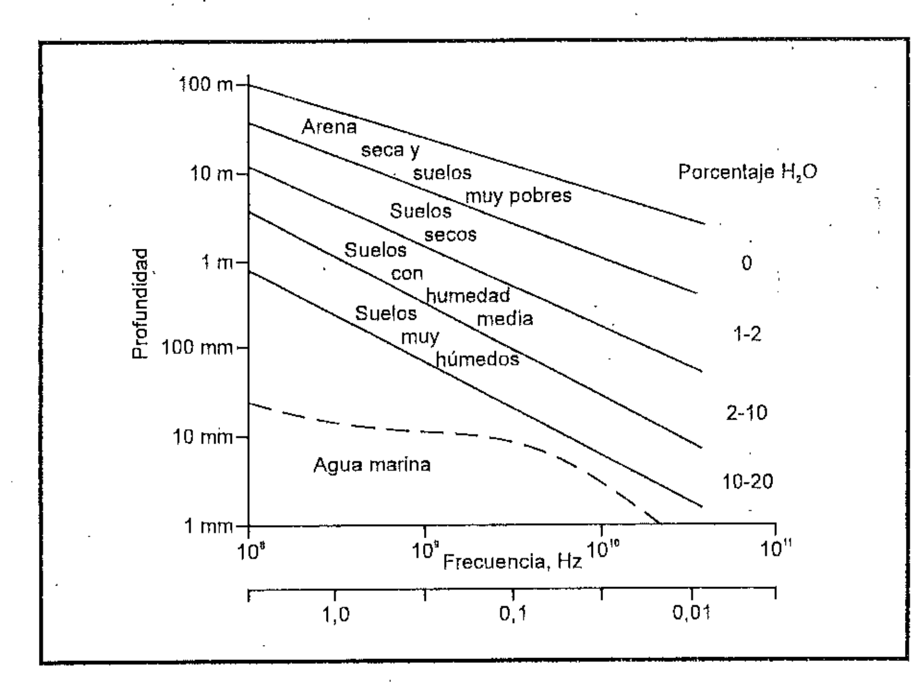


Fig. 2.20 - *Relación entre humedad del suelo y capacidad de penetración del radar a distintas longitudes de onda (adaptado de Trevett, 1986)*

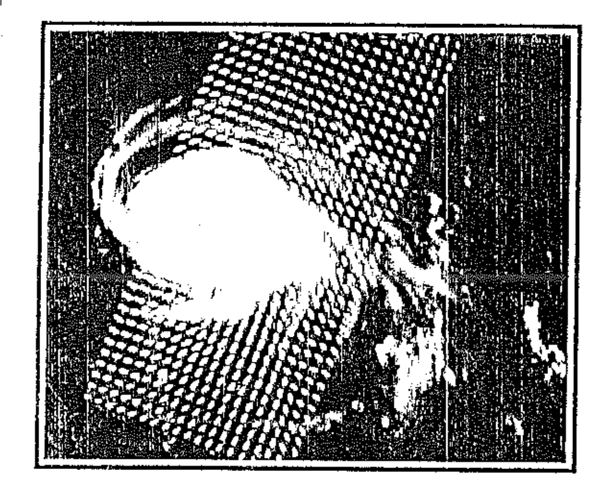


Fig. 2.22 - *Imagen del huracán Emily tomada el 30 de Agosto de 1993. Se ha superpuesto una adquisición del Meteosat-3 sobre la información de dirección y velocidad del viento proporcionada por el dispersómetro del ERS-1 (Cortesía ESA, 1994).*

2.8. Interacciones de la atmósfera con la radiación electro-magnética

Hasta aquí hemos considerado la interacción de la radiación electro-magnética con las diversas coberturas terrestres prácticamente como si este proceso se desarrollara en el vacío. Obviamente, esta suposición es falsa, puesto que entre el sensor y la superficie terrestre se interpone la atmósfera, que interfiere de formas diversas con el flujo radiante.

Como es sabido, la atmósfera se compone de gases —anhídrido carbónico, oxígeno, ozono, nitrógeno y argón, principalmente—, vapor de agua y aerosoles. Entre estos componentes, el anhídrido carbónico, ozono y vapor de agua son los principales responsables de la interacción con la energía electro-magnética. Su efecto es triple: (i) absorción de la energía en determinadas bandas del espectro, lo que limita la observación espacial a aquellas bandas en donde esta absorción es menos intensa o nula; (ii) dispersión, de determinados flujos, en función de su longitud de onda, y (iii) emisión, como todo cuerpo caliente, que tiene su mayor importancia en el infrarrojo térmico. Estos procesos introducen modificaciones, en ocasiones muy severas, en la radiación originalmente propagada entre la cubierta y el sensor.

2.8.1. Absorción atmosférica

La atmósfera se comporta como un filtro selectivo a distintas longitudes de onda, de tal forma que en algunas bandas del espectro elimina prácticamente cualquier posibilidad de observación remota. Los principales causantes de esta absorción son:

- Oxígeno atómico (O_2), que filtra las radiaciones ultravioleta por debajo de 0,1 µm, así como pequeños sectores en el infrarrojo térmico y las micro-ondas.

- Ozono (O_3), responsable de la eliminación de la energía ultravioleta, inferior a 0,3 µm, así como en un sector de las micro-ondas (en torno a 27 mm).

- Vapor de agua, con una fuerte absorción en torno a 6 mm y otras menores entre 0,6 y 2 µm.

- Anhídrido carbónico (CO_2), que absorbe en el infrarrojo térmico (15 µm), con importantes efectos en el infrarrojo medio, entre 2,5 y 4,5 µm.

Como consecuencia de esta absorción, la observación espacial se reduce a determinadas bandas del espectro, conocidas como ventanas atmosféricas, en donde la transmisividad de la atmósfera es suficientemente alta (fig. 2.23). Las principales ventanas atmosféricas son las siguientes: (i) espectro visible e infrarrojo cercano, situada entre 0,3 y 1,35 µm; (ii) varias en el infrarrojo medio: de 1,5 a 1,8 µm, 2,0 a 2,4 µm, 2,9 a 4,2 µm, y 4,5 a 5,5 µm; (iii) infrarrojo térmico, entre 8 y 14 µm, y (iv) micro-ondas, por encima de 20 mm, en donde la atmósfera es prácticamente transparente.

Estas ventanas atmosféricas son idóneas para realizar procesos de teledetección, por lo que el diseño de los sensores espaciales tiende a ajustarse a estas bandas, evitando interferencias extrañas al fenómeno que pretende observarse, salvo la presencia de nubes, que absorben en todo el espectro óptico. Si se

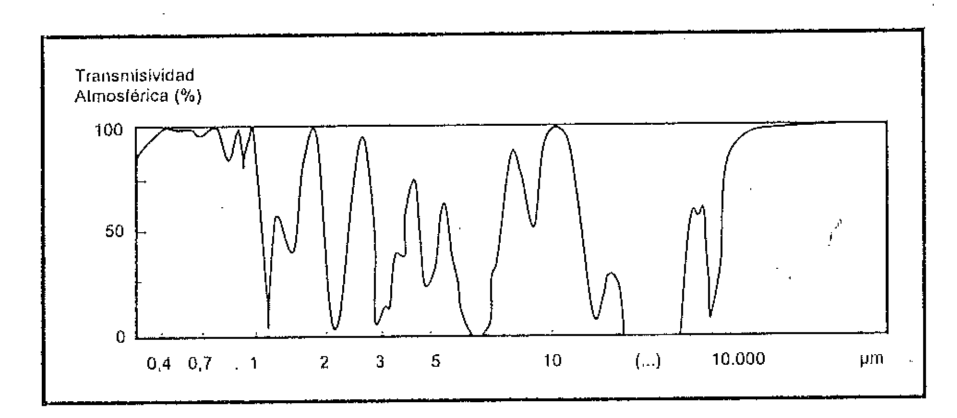


Fig. 2.23 - *Transmisividad de la atmósfera a distintas longitudes de onda (adaptado de Lillesand y Kiefer, 1987)*

pretende, por el contrario, observar la atmósfera en lugar de la superficie terrestre, los sectores espectrales más convenientes son, precisamente, aquéllos en donde la absorción atmosférica es alta. Por esta razón, los satélites meteorológicos incorporan bandas en estas regiones del espectro. Éste es el caso de la banda 2 del satélite Meteosat, comprendida entre 5,7 y 7,1 μm, que se diseñó para estudiar el contenido de vapor de agua en la atmósfera (ver fig. 3.4), o el del sensor GOME, recientemente instalado en el satélite europeo ERS-2, que cuenta con varias bandas en el ultravioleta para el seguimiento de la capa de ozono.

2.8.2. Dispersión atmosférica

Con ser de gran importancia, el efecto de absorción puede paliarse simplemente situando las bandas de observación en áreas donde la transmisividad atmosférica sea alta. Por ello, no resulta muy habitual encontrar este problema en la interpretación de imágenes (salvo en caso de coberturas nubosas, normalmente evitables gracias a una buena selección de la imagen). Mucho más complejo, sin embargo, es soslayar el efecto de dispersión causada por la atmósfera, presente —en mayor o menor grado— en cualquier imagen adquirida con sensores remotos.

La dispersión de la radiación electro-magnética es causada por la interacción entre ésta y los gases y partículas atmosféricas en suspensión. La reflexión consiguiente a ese choque supone un aporte adicional a la radiancia proveniente de la superficie terrestre (luz atmosférica). En definitiva, se reduce la radiancia directa, aumentándose la difusa. Puesto que las partículas atmosféricas son muy variables en el tiempo y en el espacio, resulta muy complejo cuantificar su influencia final en la imagen adquirida por el sensor. Pese a ello, convendrá tener en cuenta este factor, especialmente cuando se pretenda convertir los valores digitales de la imagen a parámetros físicos (7.1.2), o se aborden estudios multi-temporales (7.3).

Los principales causantes de la dispersión atmosférica son los aerosoles y el vapor de agua. Los aerosoles son partículas en suspensión de origen muy diverso: oceánico —debidas al movimiento de las aguas—, o continental, polvo en suspensión o partículas emitidas por combustión. En función de su origen y características poseen muy variados tamaños, lo que implica distintos tipos de dispersión, ya que ésta es muy dependiente de su diámetro. De esta forma, se habla de dispersión *Rayleigh*, cuando afecta a longitudes de onda inferiores al diámetro de la partícula; dispersión *Mie*, cuando se trata de partículas de diámetro similar a la longitud de onda, y de dispersión no selectiva, cuando se mencionan las partículas de mayor tamaño.

La dispersión *Rayleigh* afecta a las longitudes de onda más cortas (fig. 2.24). Es la más conocida y la de mayor influencia en teledetección, causante, por ejemplo

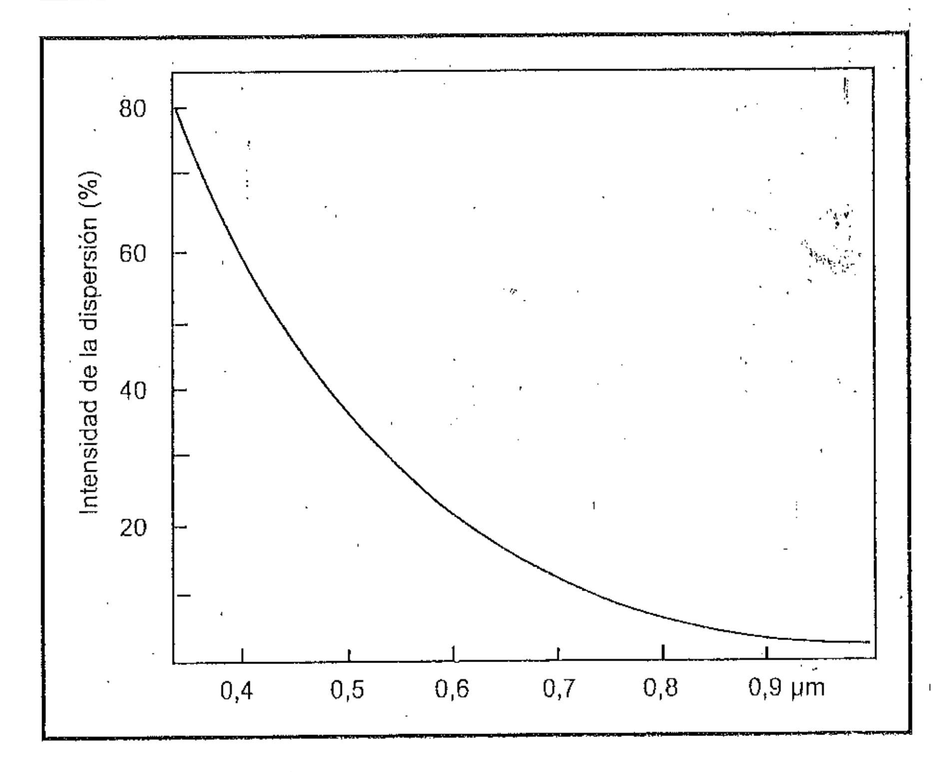


Fig. 2.24 - *Dispersión atmosférica a distintas longitudes de onda (adaptado de Campbell, 1987)*

del color azul del cielo. En fotografía aérea, es muy claro su efecto por el tono azulado que presentan los fotogramas cuando se realizan desde cierta altura. Cualquier observador distante puede comprobar este resultado, especialmente en los meses de verano, cuando se difumina el paisaje al divisarlo a largas distancias (calima).

En cuanto a la dispersión *Mie*, es también dependiente de la longitud de onda, si bien en menor grado que la anterior. Aerosoles y polvo atmosférico son los principales responsables de este tipo de dispersión, aunque también está presente en incendios forestales o en brumas costeras. Por último, la dispersión no selectiva afecta por igual a diversas longitudes de onda. Por esta razón, las nubes o nieblas tienden a aparecer blancas, ya que dispersan por igual toda la luz visible.

Los procesos de dispersión son muy complejos y difíciles de cuantificar en la imagen resultante. Normalmente no se dispone de datos coetáneos a la adquisición de ésta, por lo que la corrección atmosférica se basa en relaciones entre elementos de la propia imagen (7.1.2). Esta estimación puede ser burda en algunos casos, y dificulta, en última instancia, el uso de las imágenes adquiridas por sensores espaciales como medida cuantitativa de parámetros bio-físicos.

2.8.3. EMISIÓN ATMOSFÉRICA

El efecto de emisión atmosférica resulta fundamental en el trabajo dentro del infrarrojo térmico, si se pretenden obtener mediciones de temperatura a partir de las imágenes espaciales. Al igual que cualquier cuerpo por encima del cero absoluto, la atmósfera emite energía calorífica, por lo que ese parámetro debe considerarse para separarlo de la emitancia espectral proveniente del suelo. Esos procesos de corrección atmosférica se han abordado, habitualmente, mediante el análisis combinado de la señal captada en dos bandas situadas en el infrarrojo térmico. Son los denominados algoritmos de ventana partida (*split window*) que tendremos ocasión de comentar más adelante (7.1.2).



SISTEMAS ESPACIALES DE TELEDETECCIÓN

«Tras de un amoroso lance,
y no de esperanza falto,
volé tan alto, tan alto,
que le di a la caza alcance.»

[San Juan de la Cruz, *Poesía Completa*]

3.1. TIPOS DE SISTEMAS

Como ya se indicó en el primer capítulo, un sistema de teledetección requiere, al menos, tres componentes: foco energético, superficie terrestre y sensor. Del primero y segundo se trató en el epígrafe sobre principios físicos. En éste se aborda el estudio de las características del sensor y de la plataforma que lo sustenta.

Entre las variadas formas de clasificar los sensores remotos, una de las más habituales considera su procedimiento de recibir la energía procedente de las distintas cubiertas. En este sentido, se habla de dos tipos de sensores: (i) pasivos, cuando se limitan a recibir la energía proveniente de un foco exterior a ellos, y (ii) activos, cuando son capaces de emitir su propio haz de energía. Estos últimos son, lógicamente, más flexibles, puesto que no dependen tanto como los primeros de las condiciones exteriores al sistema sensor-Tierra.

Una ulterior clasificación entre los sensores pasivos, considera su procedimiento para grabar la energía recibida. De acuerdo a ello, puede hablarse de sensores fotográficos, óptico-electrónicos y de antena. Los primeros resultan muy familiares, puesto que se basan en las mismas técnicas aplicadas en la fotografía convencional. El resto son peor conocidos por el gran público, si bien sistemas similares se utilizan rutinariamente: cámaras de vídeo, equipos de barrido o *scanners* en exploración médica, y radiómetros de micro-ondas en radio difusión.

En cuanto a los sensores activos, el equipo más conocido es el radar, bastante utilizado en aplicaciones militares, así como en control del tráfico aéreo. El radar trabaja en la región de las micro-ondas. Por su parte, el lídar, luz polarizada o láser, opera en el espectro óptico.

Antes de comentar con mayor detenimiento cada uno de estos sensores, conviene analizar algunos conceptos previos que les afectan a todos, y son muy útiles para centrar su rango de aplicaciones a distintos problemas medio ambientales.

3.2. Resolución de un sistema sensor

De acuerdo con algunos autores, podemos definir la resolución de un sistema sensor como su habilidad para discriminar información de detalle (Estes y Simonett, 1975). Esta definición engloba varios aspectos que merecen un comentario más detallado. Por un lado, se habla de resolución de un sistema sensor, indicando que este concepto se refiere al conjunto del equipo y no a cada una de sus partes. Dicho de otra forma, la resolución de un sensor depende del efecto combinado de sus distintos componentes. Una mejora en la lente —por ejemplo— no supondrá necesariamente adquirir fotografías con mayor resolución, si no se acompaña de una película de mayor sensibilidad, o no se modifican las condiciones de exposición.

Los términos de la definición «discriminar» e «información de detalle» merecen también una breve reflexión. Ambos son relativos al propósito y al entorno geográfico del proyecto que se esté abordando. La separabilidad entre objetos está en íntima relación con la escala de trabajo y con la complejidad del paisaje. Por ejemplo, pueden detectarse algunos rasgos geográficos, como ríos o carreteras, de anchura inferior a la resolución espacial del sensor, siempre y cuando exista suficiente contraste radiométrico entre la señal proveniente de estos rasgos y la de cubiertas vecinas. En otras palabras, cuanto mayor sea ese contraste entre cubiertas, más fácilmente se distinguirán éstas. En cuanto al significado de «información de detalle», conviene considerar que se refiere no sólo al detalle espacial que proporciona el sensor, sino también al número y anchura de las bandas del espectro que alberga, a su cadencia temporal, y a su capacidad para distinguir variaciones en la energía que detecta (Campbell, 1987). Todas estas dimensiones son de interés para discriminar cubiertas o establecer modelos de significado físico. En definitiva, el concepto de resolución implica cuatro manifestaciones: espacial, espectral, radiométrica y temporal.

3.2.1. Resolución espacial

Este término designa al objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre una imagen. En un sistema fotográfico, suele medirse como la mínima separación a la cual los objetos aparecen distintos y separados en la fotografía. Se mide en milímetros sobre la foto —o metros sobre el terreno—, y depende de la longitud focal de la cámara y de su altura sobre la superficie.

Por su parte, en los sensores óptico-electrónicos, se prefiere utilizar el concepto de campo de visión instantáneo (*instantaneous field of view*, IFOV). El IFOV se define como la sección angular, medida en radianes, observada en un momento determinado por el sensor. En lugar de esta definición, habitualmente suele utilizarse la distancia sobre el terreno que corresponde a ese ángulo, que puede calcularse a partir de él, conociendo la distancia del suelo al sensor[1]. Esa distancia se corresponde al tamaño de la mínima unidad de información incluida en la imagen, que se denomina píxel (del ingles *picture element*). Ésta es la medida más generalizada de resolución espacial, aunque también se emplean otros términos más complejos, como ERE (*effective resolution element*) o EIFOV (*effective instantaneous field of view*), que consideran la señal detectada como una función modulada compuesta (Townshend, 1980).

En cualquier caso, conviene considerar que la resolución espacial de un sensor óptico-electrónico depende de varios factores, como son la altura orbital, velocidad de exploración, y número de detectores. En cuanto a los sensores de antena, su resolución depende del radio de abertura, de la altura de la plataforma, y de la longitud de onda a la que trabajen. Cuanto mayor sea el radio, y menor la altitud y la longitud de onda, la resolución será tanto más detallada.

La resolución espacial de los sensores de observación terrestre en funcionamiento recoge un rango bastante amplio (fig. 3.1). Los satélites de recursos naturales, diseñados para adquirir información sobre áreas muy heterogéneas, suelen contar con resoluciones de cierto detalle: desde los 10 x 10 m del sensor SPOT-HRV, hasta los 120 x 120 m del canal térmico del Landsat-TM. Otro grupo de satélites, orientado hacia aplicaciones más globales, caso del HCMM-HCMR, MOS-VTIR, Nimbus-CZCS o NOAA-AVHRR, facilitan píxeles de un tamaño comprendido entre 500 y 1.100 m de lado. En el extremo de este ábanico estarían los satélites meteorológicos de órbita geoestacionaria (Meteosat, GOES, GMS), que al ofrecer una visión global de la superficie terrestre, proporcionan escaso detalle espacial, con píxeles de hasta 5 km de lado. En el futuro cercano está previso el lanzamiento de varios satélites comerciales, que ofrecerán imágenes de muy alta resolución espacial (entre 1 y 4 m), lo que permitirá ampliar al rango actual de aplicaciones de esta técnica, entrando en dominios anteriormente reservados a los medios aéreos de observación.

La resolución espacial tiene un papel protagonista en la interpretación de la imagen (5.3.2 y 7.2), por cuanto marca, de alguna forma, el nivel de detalle que ésta ofrece. Con la salvedad antes referida, parece obvio decir que sólo serán discriminables sobre la imagen elementos de tamaño superior, por lo menos, al del

[1] d = 2H tag (IFOV/2), siendo d el tamaño en el terreno de cada unidad de información (píxel) y H la altura de observación.

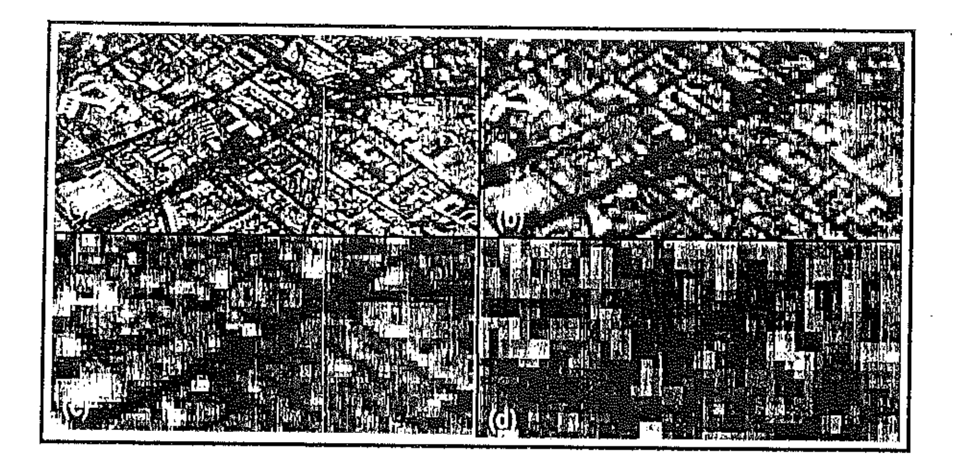


Fig. 3.1. - *Efecto de la resolución espacial para discriminar rasgos del terreno: (a) imágen de un barredor aerotransportado (ATM) sobre la ciudad de Madrid (resolución aproximada 1 m); (b) misma zona a 5 m; (c) misma zona a 10 m (la resolución del canal pancromático del satélite SPOT), y (d) misma zona a 30 m (la resolución del Landsat-TM). Imagen original, cortesía de Eduardo de Miguel, INTA.*

píxel, si bien diversos autores han demostrado que este umbral suele elevarse a cuatro veces ese tamaño mínimo. En consecuencia, la resolución espacial está en estrecha relación con la escala de trabajo y con la fiabilidad finalmente obtenida en la interpretación. Cuanto menor sea el tamaño del píxel, menor también la probabilidad de que éste sea un compuesto de dos o más cubiertas fronterizas. Un píxel mixto estará definido por una señal intermedia a las distintas cubiertas que lo componen. En consecuencia, puede no asemejarse a ninguna de ellas, lo que dificultará notablemente su correcta identificación (fig. 3.2). Sin embargo, en el caso concreto de algunas cubiertas, singularmente las urbanas, se ha comprobado que incrementar la resolución espacial puede afectar negativamente a la interpretación, cuando ésta se realiza digitalmente, al incrementar excesivamente la heterogeneidad interna en algunas categorías (Toll, 1984; Cushnie, 1987; ver cap. 7.2). En lo que se refiere a análisis visual, queda fuera de toda duda el interés de mejorar la resolución espacial para facilitar una interpretación más certera de la imagen (Hopkins et al., 1988).

3.2.2. Resolución espectral

Indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. En el capítulo anterior se puso en evidencia el interés de contar con información multi-espectral: esto es, de registrar simultáneamente el comportamiento de los objetos en distintas bandas del espectro. En este sentido, un sensor será tanto más idóneo cuanto mayor número de bandas proporcione, ya que facilita

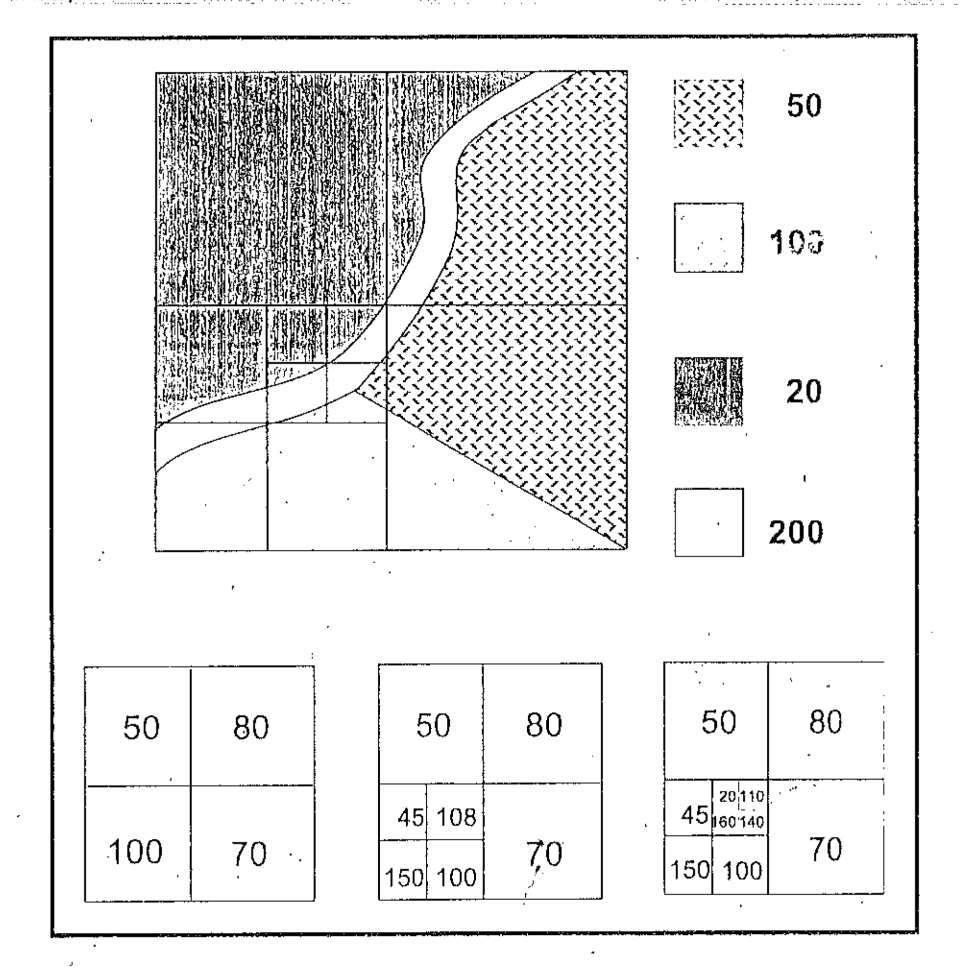


Fig. 3.2 - *Al aumentar la resolución espacial la señal recogida por el sensor resulta más cercana al valor propio de cada cubierta*

la caracterización espectral de las distintas cubiertas. A la vez, conviene que esas bandas sean suficientemente estrechas, con objeto de recoger la señal sobre regiones coherentes del espectro. Bandas muy amplias suponen registrar un valor promedio, que puede encubrir la diferenciación espectral entre cubiertas de interés (fig. 3.3).

Entre los sensores espaciales, la menor resolución espectral corresponde al radar y a los sistemas fotográficos. El primero trabaja normalmente en un solo canal, mientras la fotografía puede ofrecer películas pancromáticas, infrarrojo b/n, color natural o infrarrojo color. Por el contrario, los sensores óptico-electrónicos ofrecen un mayor rango de bandas, desde las 3 del SPOT-HRV (verde, rojo e infrarrojo cercano) hasta las 7 del Landsat-TM (azul, verde, rojo, infrarrojo cercano, medio y térmico). Aunque ha sufrido numerosos retoques, al hilo de los reajustes

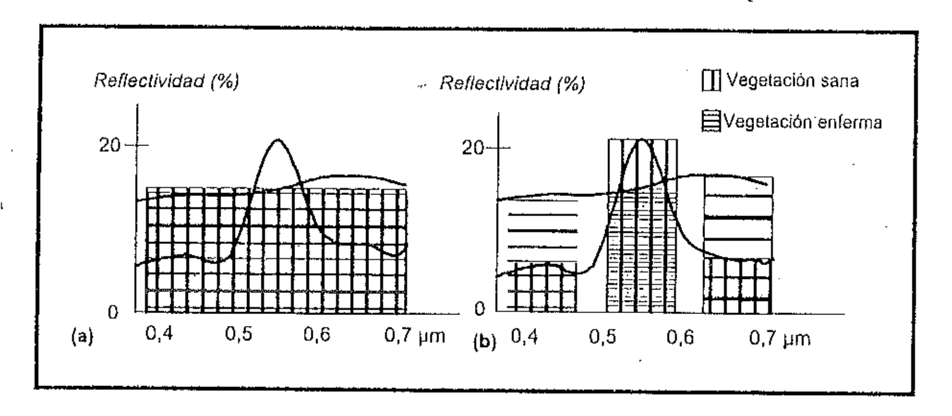


Fig. 3.3 - *Efecto de la resolución espectral en la discriminación de cubiertas: (a) si la banda es muy ancha, apenas son reconocibles las diferencias espectrales entre dos coberturas, mientras en (b) la separación es bastante evidente*

presupuestarios de la administración estadounidense, el proyecto de estación orbital (EOS) incorporará —en un inmediato futuro— sensores de mayor resolución espectral, como el MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectrometer*) que contará con 36 bandas comprendidas entre el visible y el infrarrojo térmico (Goetz, 1991). A bordo de aviones, se han obtenido datos de gran interés por el sensor HIRIS (*High Resolution Imaging Spectrometer*), dotado de 192 canales, distribuidos entre el visible y el infrarrojo cercano. Estos sensores de alta resolución espectral permiten recoger información en bandas muy estrechas, discriminando parámetros críticos de la vegetación o los suelos, que no serían perceptibles con sensores convencionales. A partir de estas imágenes, se han observado variables vitales de la vegetación, como el contenido de clorofila, lignina, nitrógeno o de agua (Curran y Kupiec, 1995), así como algunos minerales presentes en el suelo (Kruse et al., 1990). Con la puesta en órbita de estos sensores, se podrá obtener, además, información muy valiosa sobre las condiciones del océano o la composición atmosférica (Goetz, 1991), lo que mejorará nuestro conocimiento de los efectos atmosféricos en la radiación detectada por el sensor (ver cap. 7.1.2).

La elección del número, anchura y localización de las bandas que incluye el sensor está estrechamente relacionada con los objetivos de su diseño. Para un sensor dedicado a fines meteorológicos, basta situar una sóla banda en el visible, puesto que no existen diferencias cromáticas en las nubes. Por el contrario, será conveniente que incluya una o dos bandas en el térmico (que le permitan conocer la temperatura de dichas nubes), y otra en el infrarrojo medio, en donde puede observarse el contenido de humedad en la atmósfera. Ésta es, precisamente, la distribución de bandas que recoge el sensor a bordo del satélite europeo Meteosat (fig. 3.4). Por el contrario, la observación minera requiere múltiples bandas en el espectro óptico (visible, infrarrojo cercano y medio).

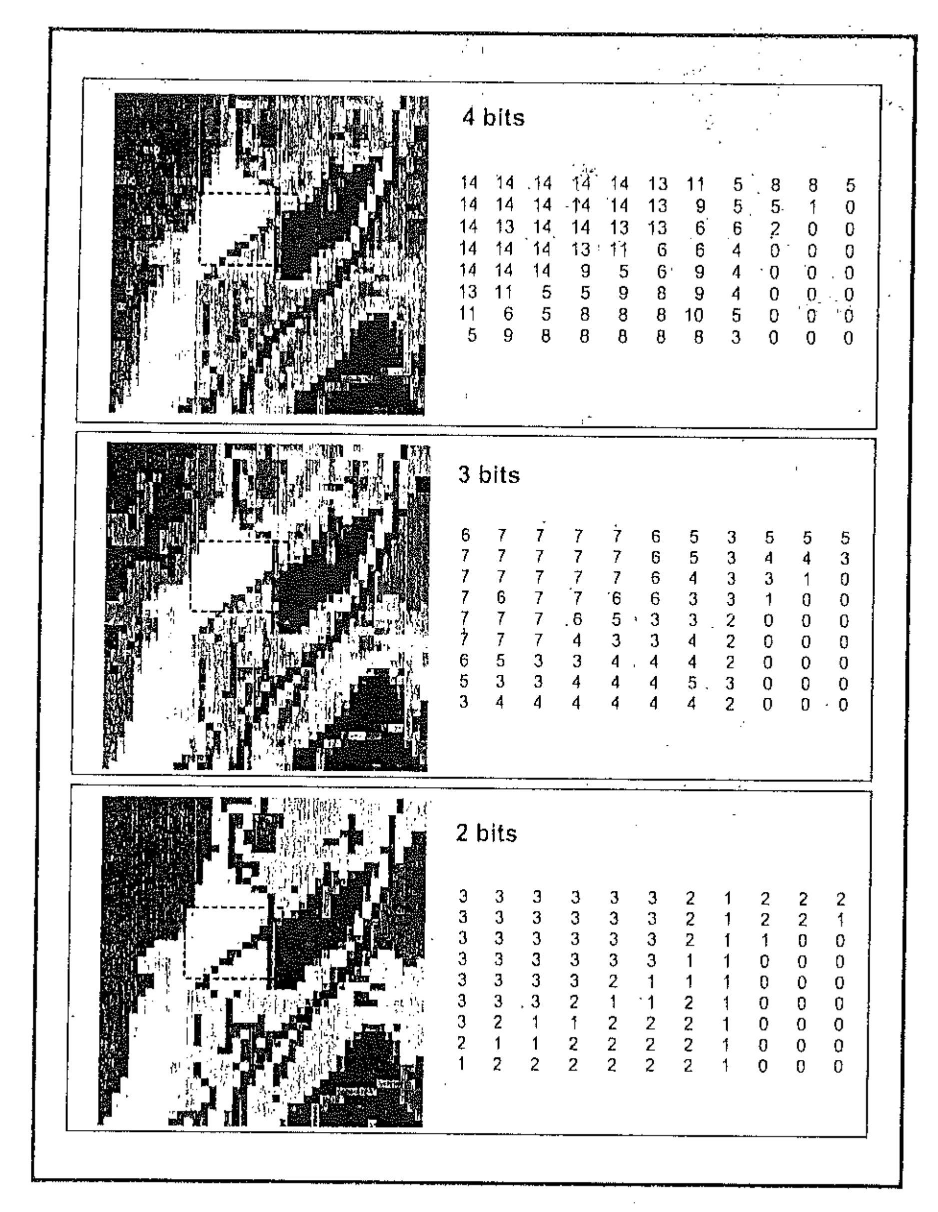


Fig. 3.4 - *Bandas espectrales proporcionadas por el satélite Meteosat. De izquierda a derecha: visible, infrarrojo térmico y vapor de agua. La imagen corresponde al 26 de junio de 1994 (Cortesía ESA,* Meteosat Collection, N. 2*).*

3.2.3. Resolución radiométrica

Hace mención a la sensibilidad del sensor, esto es, a su capacidad para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe. En el caso de los sistemas fotográficos, la resolución radiométrica del sensor se indica por el número de niveles de gris recogido en la película. Para los óptico-electrónicos, la imagen habitualmente se presenta en formato digital, por lo que la resolución radiométrica suele identificarse con el rango de valores que codifica el sensor. Por cuanto se trata de codificación digital, habitualmente se expresa esa resolución en el número de bits que precisa cada elemento de imagen para ser almacenado. Inicialmente, los Landsat-MSS ofrecían un rango de 128 niveles de codificación (7 bits, 2^7= 128) por píxel, con 64 (6 bits) para el infrarrojo cercano. Actualmente, la mayor parte de los sistemas ofrecen 256 niveles por píxel (8 bits), con la notable excepción del NOAA-AVHRR, que trabaja con 1.024 niveles (10 bits).

Al igual que en los otros tipos de resolución, cuanto mayor sea la precisión radiométrica, tanto mejor podrá interpretarse la imagen (fig. 3.5). El número de niveles más adecuado depende del método que se siga en la interpretación. Si ésta es visual, conviene considerar que el ojo humano difícilmente percibe más de 64 niveles de gris, y no más de 200.000 tonalidades. Algunos autores estiman que basta con 16 niveles por color (4.096 tonalidades) para garantizar un análisis visual adecuado (Beaven, 1988), por lo que parece superfluo contar con 256 valores digitales por banda (16,8 millones en una combinación coloreada de 3 bandas). Si se opta por la clasificación digital, la sensibilidad radiométrica puede ser mejor aprovechada, ya que el ordenador sí es capaz de distinguir una escala numérica amplia. De hecho, en los sensores planeados para la estación orbital EOS, la resolución estándar será de 16 bits por píxel (65.536 posibles valores).



4 bits

14	14	14	14	14	13	11	5	8	8	5
14	14	14	14	14	13	9	5	5	1	0
14	13	14	14	13	13	6	6	2	0	0
14	14	14	13	11	6	6	4	0	0	0
14	14	14	9	5	6	9	4	0	0	0
13	11	5	5	9	8	9	4	0	0	0
11	6	5	8	8	8	10	5	0	0	0
5	9	8	8	8	8	8	3	0	0	0

3 bits

6	7	7	7	7	6	5	3	5	5	5
7	7	7	7	7	6	5	3	4	4	3
7	7	7	7	7	6	4	3	3	1	0
7	6	7	7	6	6	3	3	1	0	0
7	7	7	6	5	3	3	2	0	0	0
7	7	7	4	3	3	4	2	0	0	0
6	5	3	3	4	4	4	2	0	0	0
5	3	3	4	4	4	5	3	0	0	0
3	4	4	4	4	4	4	2	0	0	0

2 bits

3	3	3	3	3	3	2	1	2	2	2
3	3	3	3	3	3	2	1	2	2	1
3	3	3	3	3	3	2	1	1	0	0
3	3	3	3	3	3	1	1	0	0	0
3	3	3	3	2	1	1	1	0	0	0
3	3	3	2	1	1	2	1	0	0	0
3	2	1	1	2	2	2	1	0	0	0
2	1	1	2	2	2	2	1	0	0	0
1	2	2	2	2	2	2	1	0	0	0

Fig. 3.5 - *Efecto de la resolución radiométrica en la discriminación de cubiertas*

3.2.4. Resolución temporal

Este concepto alude a la frecuencia de cobertura que proporciona el sensor. En otras palabras, refiere a la periodicidad con la que éste adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre. El ciclo de cobertura está

en función de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad, inclinación), así como del diseño del sensor, principalmente del ángulo total de abertura.

La cadencia temporal de los sistemas espaciales varía de acuerdo a los objetivos fijados para el sensor. Los satélites meteorológicos están obligados a ofrecer una información en períodos cortos de tiempo, ya que se dedican a observar un fenómeno muy dinámico. De ahí que la red de satélites geo-estacionarios (Meteosat, GOES, GMS) proporcione una imagen cada 30 minutos. Esta información se complementa con la obtenida a partir de los satélites meteorológicos de órbita polar, como el NOAA, que facilita imágenes cada 12 horas. Por el contrario, los satélites de recursos naturales ofrecen una cadencia mucho menor: entre los 16 días del Landsat y los 31 días del ERS.

3.2.5. Relaciones entre distintos tipos de resolución

Conviene aclarar que estos cuatro aspectos de la resolución están íntimamente relacionados. A mayor resolución espacial, disminuye habitualmente la temporal, y es previsible que se reduzca también la espectral (fig. 3.6). El principal problema se encuentra en la transmisión de las imágenes a la superficie terrestre. El aumento en cualquiera de los cuatro tipos de resolución significa también un incremento considerable del volumen de datos a procesar, tanto por el sensor como por la estación receptora. Por esta razón, los primeros Landsat —dotados de resolución espacial, espectral y radiométrica media— podían disponer de un sistema de grabación a bordo, que les permitía adquirir imágenes de áreas no cubiertas por la red de antenas receptoras. Al mejorar la resolución espacial, espectral y radiométrica con un nuevo sensor, los dos últimos satélites precisan estar constantemente conectados a una red de satélites de comunicaciones (denominados TDRSS), a través de los cuales envían las imágenes a las antenas receptoras. En caso de otras plataformas, como el satélite europeo ERS-1, sólo se registra información en el radio cubierto por las antenas receptoras, de ahí que no haya sido posible disponer de datos, de modo rutinario, de algunas zonas del mundo para las que no existían acuerdos de recepción.

Puesto que los diferentes tipos de resolución están relacionados, cada sistema de teledetección ofrece unas características particulares en función de los fines para los que se diseña. Si está orientado a la detección de fenómenos efímeros en el tiempo, deberá realzarse su cobertura temporal, aun a costa de perder resolución espacial, como ocurre con los satélites meteorológicos. Si, por el contrario, el sensor se orienta a exploración minera, el detalle espacial y espectral resulta más importante, reduciéndose entonces su ciclo temporal: un sólo sistema no puede cubrir todas las expectativas.

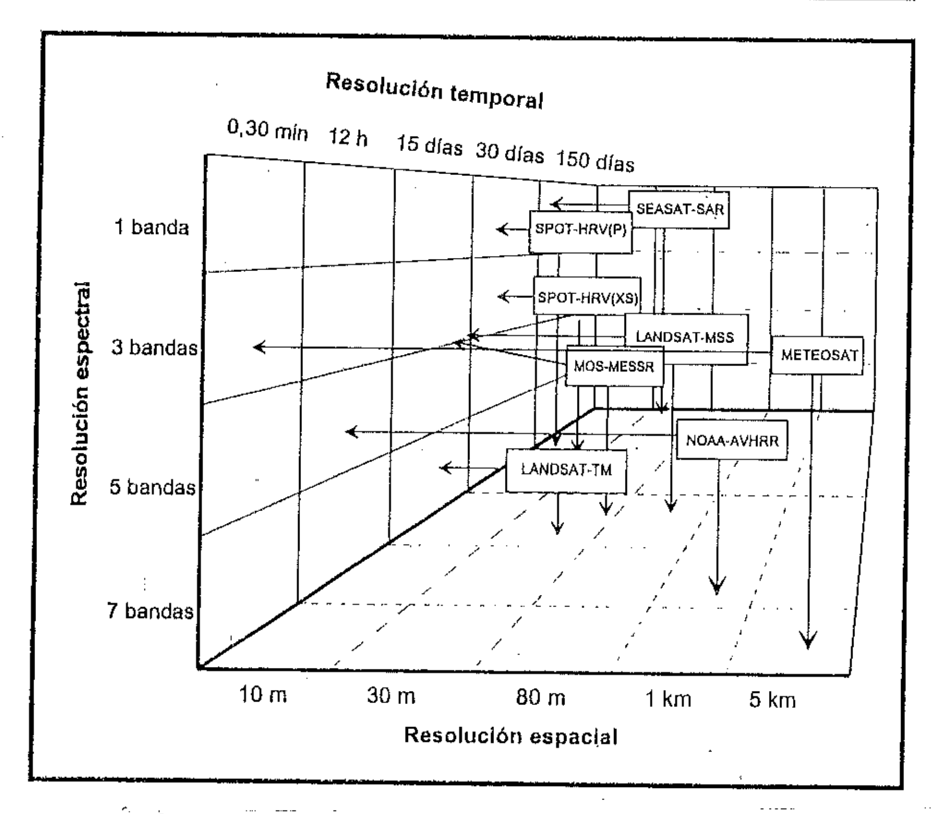


Fig. 3.6 - *Relaciones entre resolución espacial, espectral y temporal para distintos sensores*

Estos párrafos pueden contribuir a aclarar un aspecto de la resolución muchas veces malentendido. Con frecuencia se identifica la calidad del sensor con su resolución espacial. Después de lo que acabamos de decir, parece evidente que se trata de una clara simplificación, puesto que determinados estudios requerirán de modo más acuciante mejorar otros tipos de resolución. Por ejemplo, la detección de incendios forestales o la evaluación de inundaciones no tendrían validez con sensores muy precisos espacialmente, pero que ofrecieran una imagen mensual, ya que entonces las estimaciones carecerían de interés. Por esta razón, es cada vez más frecuente el uso de satélites meteorológicos —que tienen buena resolución temporal— para aplicaciones terrestres, ampliando su finalidad original. Por el contrario, otras aplicaciones de la teledetección deben enfatizar la resolución espectral; por ejemplo, cuando se trate de discriminar cubiertas con un comportamiento radiométrico muy similar, sólo divergente en bandas muy particulares del espectro. La estimación de cosechas requiere con frecuencia este tipo de sensores, que permiten discriminar fiablemente diferentes cultivos o rendimientos.

3.3. Sensores pasivos

Los sensores pasivos se limitan a recoger la energía electro-magnética procedente de las cubiertas terrestres, ya sea ésta reflejada de los rayos solares, ya emitida en virtud de su propia temperatura. De acuerdo a nuestra previa clasificación, puede establecerse una división en estos sensores en función del procedimiento que emplean para recibir la radiación procedente de los objetos. Antes se aludía a los sensores fotográficos, óptico-electrónicos y de antena. En el primer grupo estarían las cámaras fotográficas; en el segundo, los exploradores de barrido y de empuje, y las cámaras de vidicón, mientras los sensores pasivos de antena se conocen con el nombre de radiómetros de micro-ondas.

3.3.1. Sensores fotográficos

Las cámaras fotográficas todavía siguen siendo el medio más utilizado de teledetección, especialmente desde plataformas aéreas. Basan su funcionamiento en la impresión de un objeto sobre emulsiones fotosensibles, con el apoyo de un sistema óptico que permite controlar las condiciones de exposición. Dentro de esta configuración básica, pueden establecerse numerosas variantes, en función de cuatro elementos: tipo de película, número de objetivos, ángulo de observación y altura de la plataforma.

Respecto al tipo de película, el más empleado en fotografía aérea es el film pancromático (blanco y negro), en el cual se recoge todo el espectro visible sobre una sola emulsión. En la película en color, se mezclan distintas capas fotoquímicas, cada una de las cuales es sensible a una banda del espectro visible, por lo que la discriminación de los objetos resulta más atinada. Menos conocidos en nuestro país son los filmes en infrarrojo blanco y negro —que recogen en tonos de gris la radiación correspondiente al infrarrojo cercano—, y en infrarrojo color, también denominado falso color, en donde se desplaza la escala de color natural, situándose entre el verde y el infrarrojo cercano.

En cuanto al número de objetivos, puede tratarse de una cámara mono o multibanda, según albergue una o varias regiones del espectro simultáneamente. En este segundo caso, la observación múltiple puede realizarse con dos modalidades: incorporando varios objetivos —cada uno de ellos con un filtro apropiado— en una sola cámara, lo que permite impresionar la misma imagen en diversas bandas del espectro (fig. 3.7); o bien, ensamblando varias cámaras sobre el mismo soporte, cada una de ellas con filtros y filmes apropiados, con lo que se obtendrían simultáneamente distintas fotografías de la misma zona.

En lo que atañe al ángulo de observación, conviene anotar la diferencia entre fotografía vertical, tomada perpendicularmente al terreno (con 5° de desvia-

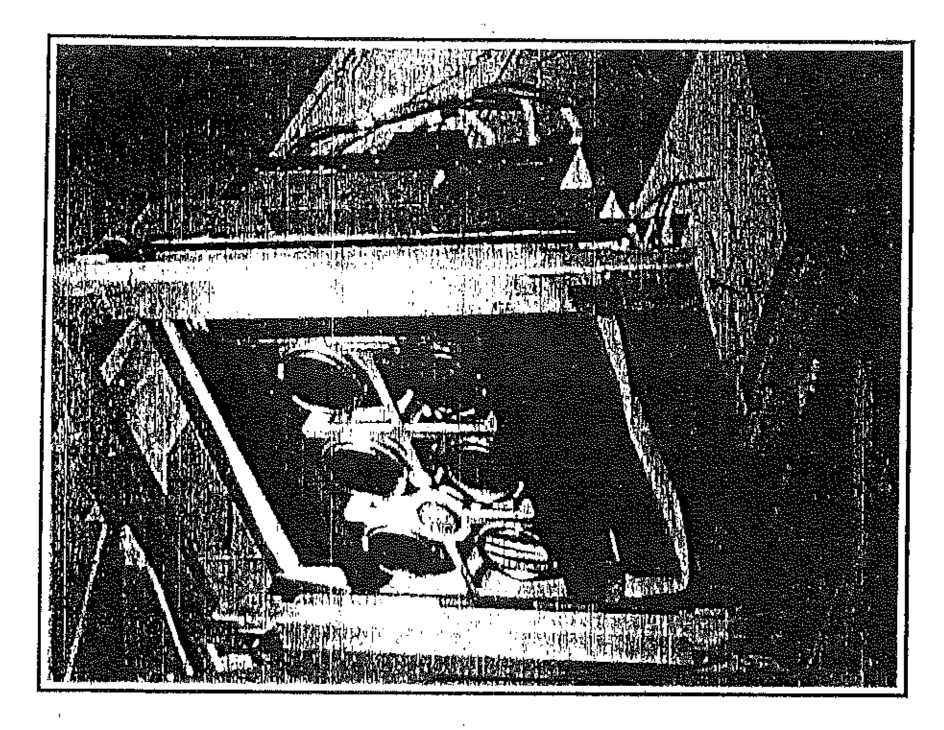


Fig. 3.7 - *Cámara Multibanda MKF-6 (cortesía R. Núñez)*

ción permitida), y fotografía oblicua, con un ángulo de visión sensiblemente inferior a 90°. La primera se emplea, con el debido recubrimiento, para la restitución fotogramétrica, así como en estudios temáticos muy variados. La fotografía oblicua tiene principalmente un fin estético, aunque también puede reportar interesantes conclusiones para el estudio del relieve o los asentamientos humanos, entre otras facetas de interés científico.

Por último, la altura de observación permite distinguir entre fotografía aérea y espacial. Desde el punto de vista de su aplicación a estudios de medio ambiente, las diferencias más significativas entre ambas afectan a su resolución espacial, nitidez, cobertura del terreno y precisión geométrica. Las dos primeras son favorables a la fotografía aérea, y las dos últimas a las cámaras espaciales.

De acuerdo al contenido de esta obra, nos centraremos en el análisis de los programas de exploración fotográfica desde plataformas espaciales. Históricamente estas experiencias fueron las pioneras de teledetección desde el espacio. Las primeras fotografías espaciales se obtuvieron durante la misión Mercury-4, a las que siguieron las adquiridas por las cápsulas Gemini y Apollo. En un primer momento estas fotografías se adquieren casi espontáneamente, pero más tarde, y ante la calidad de los resultados, se comenzaron a diseñar proyectos dirigidos

específicamente a la observación de los recursos naturales. Este fue el caso de la misión Gemini GT-4 que incluyó el primer experimento programado de teledetección espacial, concretamente para aplicaciones geológicas.

A esta tentativa siguieron otras de gran interés, a bordo de diversas misiones Apollo, que sirvieron para preparar el terreno a otros programas dedicados exclusivamente a la observación terrestre. En este sentido, conviene destacar el papel del laboratorio espacial tripulado *Skylab*, activo, con diversas tripulaciones, durante 1973. En esta plataforma se incluyó un programa de observación terrestre bautizado como EREP (*Earth Resources Experiment Package*), que incluía diversos sensores: un barredor multi-espectral, dos sensores de micro-ondas y dos sensores fotográficos. Estos últimos eran la cámara multi-espectral (S 190A), con seis objetivos sensibles a distintas longitudes de onda entre 0,4 y 0,9 µm, y la cámara de observación terrestre (ETC, *Earth Terrain Camera*), dotada de una gran focal (457 mm), que se diseñó para obtener fotografías de alta resolución (15 m) a 435 km de altitud (NASA, 1977). A partir de estas fotografías se realizaron estudios temáticos muy variados: cobertura del suelo, cartografía litológica, vegetación y cultivos (Hart, 1975; Links, 1976; NASA, 1977).

A consecuencia del éxito de esta experiencia, se concibieron esperanzas de que las cámaras espaciales sirvieran como base para la restitución fotogramétrica —por procedimientos similares a los practicados con fotografía aérea—, remediando así la gran carencia mundial de cartografía básica. Hasta el momento se han diseñado tres cámaras de alta precisión con estos fines: la cámara métrica RMK 30/23, la cámara de gran formato (LFC) y la cámara multi-espectral MKF-6.

La cámara métrica RMK 20/23 se construyó por la casa Zeiss para proporcionar fotografías estereoscópicas de gran precisión y elevada cobertura, con un formato convencional (23 x 23 cm). Fue incluida en la primera misión *Spacelab* de la Agencia Espacial Europea (1983), a bordo del transbordador espacial estadounidense. Esta misión permitió adquirir unas 1.000 fotografías con película pancromática e infrarrojo color sobre varias regiones del mundo, cubriendo una zona aproximada de 11 millones de km² (Konecny, 1986). La longitud focal era de 305 mm, lo que proporcionó una escala aproximada de 1:820.000 a 250 km de altura, con una resolución estimada entre 20 y 30 m. La cobertura estereoscópica se cifró en 60 %, aunque en áreas montañosas se extendió hasta el 80 %. Las restituciones practicadas a partir de estas fotografías han permitido obtener cartografía básica a escala 1:100.000 (Schroeder, 1986).

Un ejemplo de este tipo de fotogramas puede analizarse en la figura 3.8. Se trata de un par estereoscópico enmarcado entre los Picos de Urbión y la Sierra de Ayllón, en la región central española, cubriendo un área aproximada de 15.000 km². Aquellos lectores familiarizados con la fotografía aérea, posiblemente queden fascinados al percibir el relieve de una zona tan extensa, contemplada

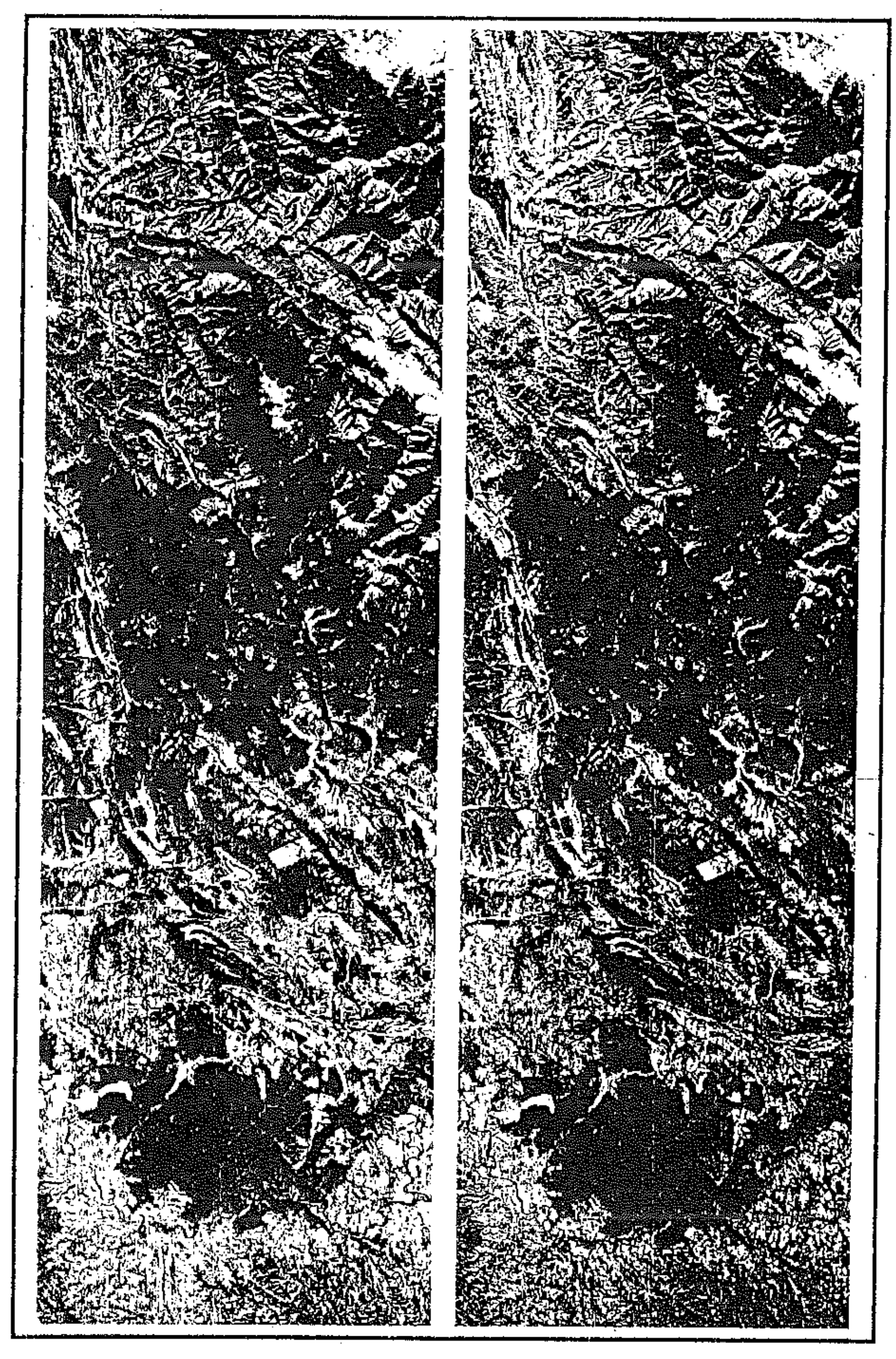


Fig. 3.8 - *Par estereoscópico de la cámara métrica RMK 20/23 sobre los Picos de Urbión (cortesía R.Núñez - Inst. Geográfico Nacional)*

desde 250 km de altura. Junto a los rasgos morfológicos que ofrecen estas fotografías, resulta también de gran interés su visión panorámica, global, de las cubiertas vegetales, sin olvidar su aplicación cartográfica, principal objetivo de esta misión. El cambio de orientación en las misiones del *Space Shuttle*, tras el desastre del *Challenger*, interrumpió el empleo de esta cámara.

Similar suerte corrió la cámara de gran formato (*Large Format Camera*, LFC). Diseñada por ITEK con la misma finalidad que la cámara europea (cartografía básica), su principal novedad consiste en ampliar el área observada, gracias a disponer de un formato de 23 x 46 cm (frente al 23 x 23 convencional). Esta cámara se empleó por vez primera en la misión 41-G del *Space Shuttle* (1984), obteniéndose una variada colección de fotografías con un recubrimiento de hasta el 80 %, lo que facilitó precisiones en altura de 30 m, a una escala 1:50.000 (Togliatti, 1986). La misma cámara ha sido empleada en otras misiones del transbordador espacial norteamericano, tanto con películas pancromáticas como color (Francis y Jones, 1984; Lulla, 1993).

Un buen ejemplo de la información adquirida por esta cámara aparece en la figura 3.9, que abarca unos 47.000 km² en el centro de España (la original comprende unos 62.000 km²). La amplitud de la zona incluida en el fotograma permite percibir una visión global de la región centro, desde el embalse de Santa Teresa (Salamanca) hasta el parque nacional de las Tablas de Daimiel (Ciudad Real). La magnífica resolución espacial que ofrece la cámara LFC se pone aún más en evidencia gracias a la ampliación de esta imagen que ofrece la figura 3.10, situada sobre la ciudad de Madrid y Monte del Pardo. Tras un análisis detallado podrán extraerse rasgos de gran interés sobre la imagen: morfología metropolitana, red viaria, expansión urbana hacia espacios cubiertos por vegetación natural, etc.

En las últimas misiones del transbordador norteamericano, se han utilizado cámaras más convencionales, como la Hasselblad de 70 mm y Aerotechnika de 5 pulgadas. Recientemente se han comenzado experiencias con la cámara digital ESC (*Electronic Sill Camera*) que ofrece una resolución de 1024 x 1024 píxeles en blanco y negro, aunque se estudia su amplicación a la misma resolución en color y hasta 2048 x 2048 en blanco y negro (Lulla, 1993).

La creciente apertura de los países del Este, está brindando la posibilidad de acceder a las imágenes adquiridas por proyectos soviéticos de teledetección. Los más interesantes cuentan con cámaras fotográficas de alta precisión, mejor adaptadas a la cartografía temática que las anteriormente vistas. Una de las más destacadas es la cámara multi-espectral MKF-6 (fig. 3.7), instalada a bordo de diversas misiones del satélite Soyuz. Dotada de seis objetivos, permite obtener fotografías sobre seis bandas del espectro, del azul al infrarrojo cercano. También han sido muy empleadas las cámaras KFA-200, a bordo de los satélites RESURS-F, con una resolución espacial de 25-30 m y 3 bandas espectrales (verde, rojo e

Fig. 3.9 - *Fotografía de la Cámara de Gran Formato sobre el Sistema Central y Valle del Tajo (cortesía R.Núñez - F.Doyle)*

Fig. 3.10 - *Ampliación de la fotografía anterior sobre la ciudad de Madrid y alrededores*

infrarrojo cercano), la pancromática KFA-1000, con resolución de 8-10 m, y la MKF-4, multiespectral con 12 a 14 m. de resolución (Kramer, 1994). Estas fotografías facilitan una información muy valiosa para el estudio de los recursos naturales, hídricos y minerales (Sagdejew, 1982; Strain y Engle, 1993). El consorcio Sojuzkarta se encarga de la distribución de estos fotogramas, así como de las imágenes adquiridas por otros sensores a bordo de satélites soviéticos (Hyatt, 1988).

3.3.2. Exploradores de barrido

Las características técnicas de los sensores fotográficos impiden que desde ellos se realice una cobertura sistemática de la superficie terrestre, por cuanto no facilitan una transmisión a distancia de las imágenes captadas. Por esta razón se han diseñado otro tipo de sensores, denominados genéricamente óptico-electrónicos, ya que combinan una óptica más o menos similar a la fotografía, con un sistema de detección electrónica, que evita la dependencia de una superficie sólida.

Entre estos sensores, los más habituales en teledetección espacial son los exploradores o rastreadores de barrido (*scanners*). Un espejo móvil, que oscila perpendicularmente a la dirección de la trayectoria, les permite explorar una franja de terreno a ambos lados de la traza del satélite. La radiancia recibida por este componente óptico se dirige a una serie de detectores, que la amplifican y convierten a una señal eléctrica. Ésta, a su vez, se transforma a un valor numérico, que puede almacenarse a bordo o transmitirse a la red de antenas receptoras (fig. 3.11). La información recibida por estas antenas se graba en cintas compatibles con ordenador (CCT), para su posterior proceso.

En suma, el sensor convierte una señal analógica, la radiancia recibida, en un valor digital, por lo que no puede hablarse propiamente de fotografías —aunque, en ocasiones, se presenten en formato fotográfico—, sino de imágenes digitales, en razón de su estructura interna. Estos valores numéricos pueden traducirse, de nuevo, en niveles de reflectividad o temperatura, conociendo los coeficientes de calibrado del sensor y las condiciones de adquisición (7.1.2). En definitiva, es posible realizar la conversión contraria, digital-analógica, para obtener los valores originalmente detectados por el sensor. En definitiva, estos sensores no sólo facilitan una imagen, sino también una medición física de la superficie que observan.

El número y características de los detectores que incorpora un equipo de barrido es muy importante para explicar las condiciones de la imagen resultante. La señal enviada por el equipo óptico a estos detectores se muestrea a intervalos regulares, de tal forma que únicamente se graba un valor numérico cada cierta

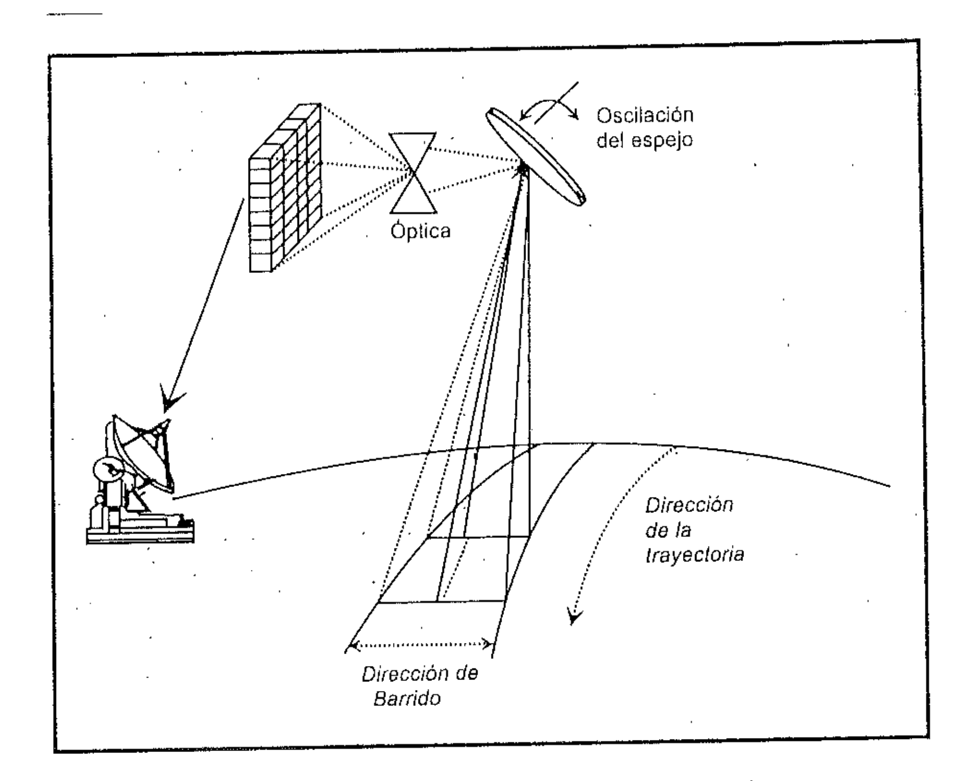


Fig. 3.11 - *Diagrama de un explorador de barrido*

distancia. Ese intervalo marca el tamaño de la unidad mínima de información adquirida por el sensor, que se denomina píxel. La señal detectada para cada píxel está en íntima relación con el tipo de cubierta observada. Como hemos visto, esta señal puede provenir de una superficie homogénea, con una sola cobertura, o heterogénea, con varias. En el primer caso, el valor del píxel definirá correctamente a dicha cubierta; en el segundo, resultará un promedio de las características espectrales de todas ellas, lo que dificultará su posterior interpretación.

En la mayor parte de los equipos de exploración por barrido, la señal recibida se descompone a bordo en varias longitudes de onda, cada una de las cuales se envía a un tipo especial de detectores, sensibles a ese tipo de energía. En ese caso, se habla de exploradores de barrido multi-espectral, pues detectan la misma superficie de terreno en distintas bandas del espectro. El número y anchura de esas bandas —lo que hemos denominado resolución espectral— está en función del diseño del propio sensor: del número de detectores con que cuente, de su óptica, capacidad de almacenamiento y transmisión de datos, etc.

Las ventajas más claras de los equipos de barrido multi-espectral, en relación con los sensores fotográficos, pueden sintetizarse en los siguientes puntos:

(i) Permiten ampliar la banda del espectro detectada a longitudes de onda mayores del visible. Las emulsiones fotográficas están limitadas al rango 0,4 a 0,9 µm (visible e infrarrojo reflejado), mientras los equipos de barrido pueden abarcar de 0,4 a 12,6 µm, incluyendo el infrarrojo medio y el térmico.

(ii) Mayor facilidad en la calibración y en la corrección radiométrica de los datos.

(iii) Posibilidad de realizar coberturas sistemáticas, y de grandes espacios, gracias a su capacidad de transmitir datos en tiempo real.

(iv) Grabación digital de la información, que asegura su fiabilidad y permite su tratamiento asistido por ordenador.

Lógicamente también poseen algunos inconvenientes respecto a los sistemas fotográficos. Entre ellos, destaca su menor resolución espacial, por más que se estén haciendo grandes progresos en los últimos años, y la exigencia de contar con equipos de tratamiento más complejos para su corrección y tratamiento.

Gracias a las características arriba comentadas, los equipos de barrido multi-espectral se han incorporado sistemáticamente a las principales misiones de teledetección desde el espacio. Los más utilizados han sido los incluidos en los programas Landsat (MSS, *Multispectral Scanner*, y TM, *Thematic Mapper*), TIROS-NOAA (AVHRR, *Advanced Very High Resolution Radiometer*), Nimbus (CZCS, *Coastal Zone Color Scanner*), Skylab (S192), DMSP (*Operational Linescan System*, OLS), HCMM (HCMR, *Heat Capacity Mapping Radiometer*) y el soviético RESURS-O (*MSU-E* y *MSU-SK*).

3.3.3. Exploradores de empuje

En los últimos años se ha puesto a punto una nueva tecnología de exploración, denominada 'por empuje' (*pushbroom*). En estos equipos se elimina el espejo oscilante, gracias a disponer de una cadena de detectores que cubre todo el campo de visión del sensor. Estos detectores se van excitando con el movimiento orbital del satélite, de ahí el nombre de explorador de empuje, puesto que se explora, en cada momento, una línea completa, desplazándose ésta simultáneamente con la plataforma (fig. 3.12). Los detectores sólidos que forman un explorador por empuje se denominan dispositivos de acoplamiento por carga (*Charge Couple Devices, CCD*).

Esta tecnología permite aumentar la resolución espacial del sistema respecto a los barredores convencionales, gracias a eliminar la parte móvil, mientras se reducen algunos problemas geométricos que se producen en los barredores, caso

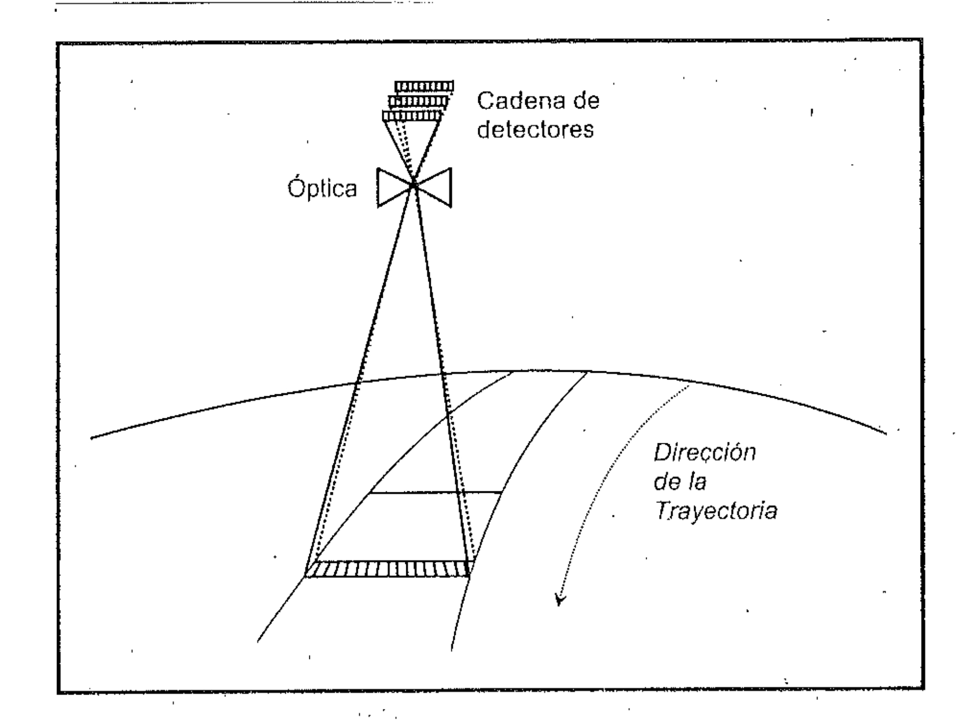


Fig. 3.12 - *Diagrama de un explorador por empuje*

de que se perdiera la sincronía entre el movimiento del espejo y el de la plataforma. Además no se requiere que los detectores sean interrogados una vez por píxel, como ocurre en los exploradores de barrido, sino sólo una vez por línea, lo que agiliza la detección y emisión de datos.

Como contrapartida, uno de los problemas importantes que atañe a estos nuevos equipos es la difícil calibración de su cadena de detectores. Al aumentar notablemente su número, se precisa de complejos mecanismos de ajuste para que éstos traduzcan, de la misma forma, la señal recibida. Caso contrario, faltaría homogeneidad entre las columnas de la imagen, afectando a su calidad final. Otro problema aún no resuelto en estos sistemas es ampliar la información espectral que proporcionan, incluyendo al infrarrojo medio y térmico. Hasta el momento presente, se han diseñado equipos mono y multi-espectrales, limitados al espectro visible e infrarrojo reflejado. El trabajo en el térmico resulta mucho más complejo por el tipo de detectores que precisa, muy sensibles al calor y de difícil calibración.

Los exploradores de empuje se han incorporado ya a varios proyectos de teledetección espacial, como es el caso del satélite francés SPOT (sensor HRV), del indio IRS (sensor LISS) y de los japoneses MOS (MESSR) y JERS-OPS, y es

previsible, pese a sus problemas, que alcancen un mayor protagonismo en proyectos futuros de observación de la Tierra.

3.3.4. Cámaras de vídeo

Otro de los sistemas pasivos de mayor uso en estudios de recursos naturales es la cámara de vídeo, que puede trabajar en forma pancromática o multi-banda. La imagen es enfocada sobre un foto-conductor, construyéndose una réplica electrónica de la imagen original, que se mantiene en esa superficie hasta que el haz de electrones la barre de nuevo, restaurando así su equilibrio (fig. 3.13).

Este modelo de funcionamiento se modificó en el caso del RBV (*Return Beam Vidicon*), a bordo de los primeros satélites Landsat. En estos sistemas, la señal de la cámara, se derivaba de la porción no utilizada del haz de electrones, que retornaba a lo largo de la misma trayectoria que el rayo incidente, y era amplificado electrónicamente. Ese mecanismo permitió mejorar la resolución espacial de los equipos de barrido y del vidicón convencional, por lo que fue incluido en

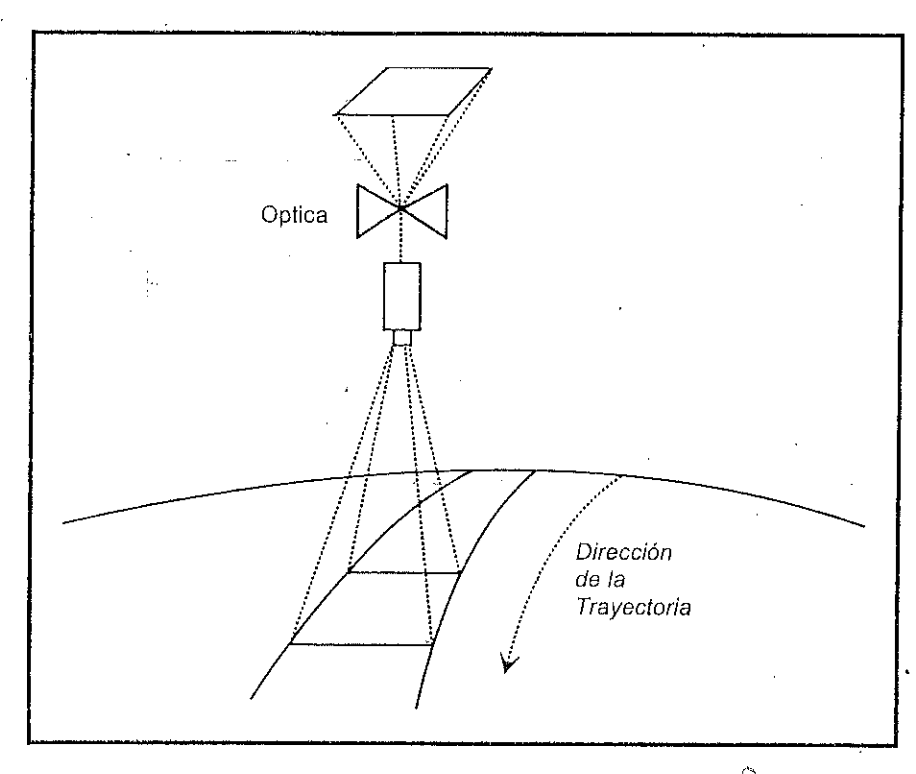


Fig. 3.13 - *Diagrama de un sistema vidicon*

algunas misiones espaciales: Apollo, Mariner, TIROS, Nimbus, Bhaskara-1 y 2, así como en los tres primeros satélites de la serie Landsat.

Más reciente resulta el empleo de las cámaras de vídeo digital como fuente de imágenes en proyectos de gran escala. La videografía se define así como una nueva técnica de teledetección, ya sea para calibrar imágenes de satélite, ya para obtener información de detalle a bordo de globos o aviones de baja altura.

3.3.5. Radiómetros de micro-ondas

Como su nombre indica, se trata de un sensor que opera en el rango del espectro correspondiente a longitudes de onda largas, normalmente entre 1 y 100 mm. Por ello, no está afectado por la situación atmosférica ni por las condiciones de iluminación.

El radiómetro está compuesto por un elemento direccional, un receptor, que permite la detección y amplificación de las micro-ondas, y un detector. Su gran desventaja estriba en la pobre resolución espacial que proporciona, ya que, al tratarse de un sensor de abertura circular, la resolución es inversamente proporcional al diámetro de abertura y directamente a la longitud de onda. En consecuencia, para poseer una adecuada resolución sería preciso contar con una antena de enormes proporciones. Pese a este problema, los radiómetros de micro-ondas se han utilizado con gran aprovechamiento para diversos estudios medio ambientales. Uno de los campos en donde ha mostrado mayor interés atañe a la cartografía de hielo y nieve, gracias a ser muy sensibles a las bajas temperaturas[2]. Esto ha permitido obtener información del estado de la capa de hielo, así como diferenciar tipos de nieve en función de su compacidad y temperatura. A este respecto, el sensor SSMR (*Scanning Multichannel Microwave Radiometer*), a bordo del Nimbus-5 y 6, se ha empleado con gran eficacia para detectar movimientos de icebergs y para cartografía de capas de hielo. Un mapa térmico de ambos casquetes polares fue obtenido a partir de estas imágenes en 1977, revelando información de gran interés para el estudio de estas áreas, difícilmente accesibles por otros medios (Hall y Martinec, 1985). Los datos de los radiómetros de micro-ondas se han mostrado también muy convenientes para estimar las condiciones de humedad en el suelo y el estrés hídrico en la vegetación (Choudhury y Nicholson, 1992). La apertura para usos civiles de los datos adquiridos por el satélite militar DMSP (*Defense Meteorological Satellite Program*), facilita la continuidad de estas observaciones, ya que cuenta con un

[2] Recuérdese que, de acuerdo a la leyes de Planck y Wien [2.4 y 2.6], cuanto mayor sea la temperatura de una superficie, emitirá más intensamente a longitudes de onda más cortas. Por tanto, sólo las cubiertas más frías son perceptibles a estas longitudes de onda.

equipo muy similar al del Nimbus, denominado SSM/I (*Special Sensor Microwave Imager*), que proporciona información en varias frecuencias, registrando tanto polarización horizontal como vertical.

3.4. Sensores activos

3.4.1. Radar

Característica común de los sistemas activos es su capacidad de emitir un haz energético que, posteriormente, recogen tras su reflexión sobre la superficie que se pretende observar. Entre ellos, el sistema más conocido es el radar, radiómetro activo de micro-ondas, que trabaja en una banda comprendida entre 0.1 cm y 1 m. Gracias a su flexibilidad —puede trabajar en cualquier condición atmosférica—, el radar está ganando la atención de la comunidad científica internacional, especialmente para su aplicación a países en donde resulta casi persistente la cobertura de nubes (fig. 3.14).

Las primeras experiencias con radar se desarrollaron sobre plataformas aéreas. El sistema más utilizado, en este contexto, fue el radar lateral aero-transportado (SLAR, *Side Looking Airborne Radar*), que mostró gran versatilidad respecto a la fotografía aérea, especialmente para estudios sobre áreas tropicales (Allan, 1983; Trevett, 1986).

El principal problema de estos sensores radica en su baja resolución, como consecuencia del escaso diámetro de la antena. La resolución espacial de un sistema de abertura circular puede calcularse como:

$$R_s = \frac{\lambda h}{\phi} \qquad [3.1]$$

esto es, el tamaño del mínimo objeto identificable sobre la imagen está en relación directa con la longitud de onda λ y la altura de observación (h) e inversa con el diámetro de abertura ϕ. Esto anula el empleo de este sistema en plataformas espaciales, pues para lograr una resolución adecuada sería preciso contar con antenas de enormes proporciones.

Tal inconveniente, no obstante, puede obviarse con el empleo del radar de abertura sintética (SAR, *Synthetic Aperture Radar*). Su principio de operación se basa en el efecto Doppler, que afecta a la observación realizada cuando existe un movimiento relativo entre objeto y sensor. En el caso del SAR, se registran los pulsos de un mismo punto de la superficie terrestre en dos momentos distintos de

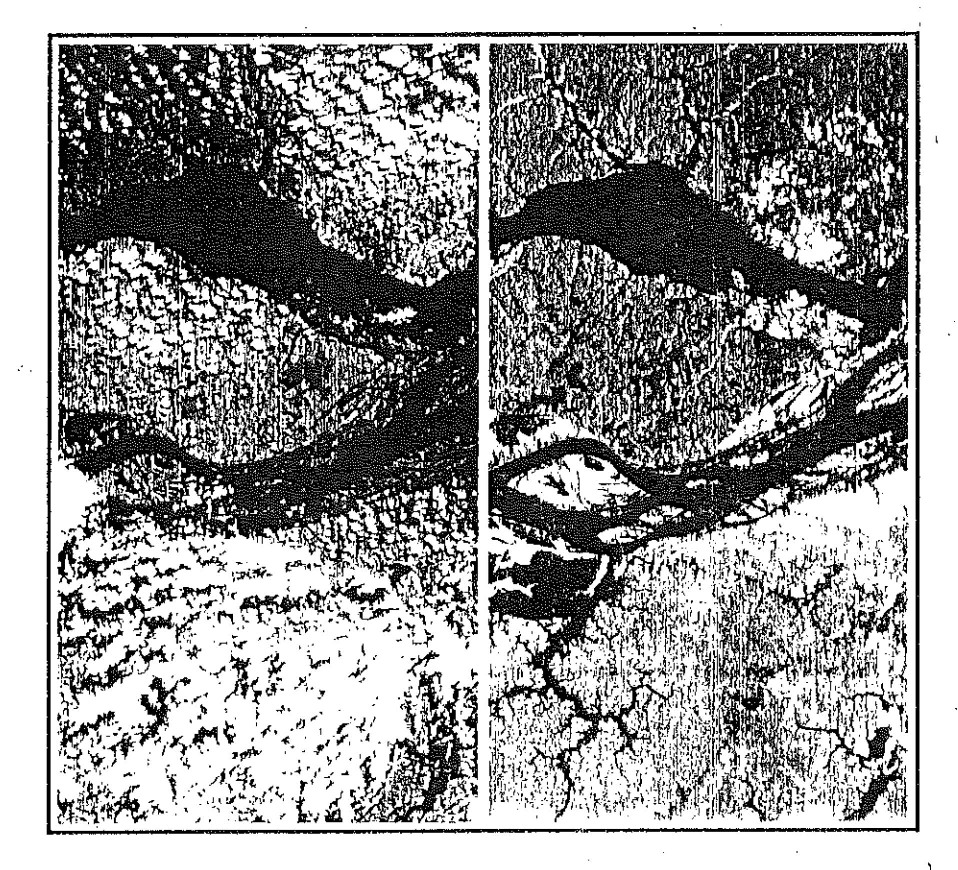


Fig. 3.14 - *Imágenes adquiridas por el satélite JERS-1 en 1993 sobre los alrededores de la ciudad brasileña de Manaos. Se observa a la izquierda una imagen del visible, siendo evidentes las masas nubosas que cubren, con bastante persistencia, el área. La imagen de la derecha corresponde al radar instalado a bordo de este mismo satélite, que no presenta distorsiones atmosféricas (Cortesía NASDA* - Earth Observation Center*).*

la trayectoria, con lo que la resolución es equivalente a la que se obtendría con una antena de similar longitud a la distancia existente entre ambos puntos (Jiménez y García, 1982; Elachi, 1987).

Tanto el radar aerotransportado como el espacial observan la superficie lateralmente. Este hecho, junto a la posibles variaciones en los ángulos de emisión e incidencia del flujo implica notables deformaciones geométricas en las imágenes radar. Si además consideramos que la señal de retorno no sólo depende del coeficiente de retrodispersión del objeto, sino también de su distancia a la antena, puede enmarcarse la complejidad en la interpretación de estas imágenes.

En primer lugar, conviene considerar que la resolución espacial es distinta en la dirección paralela a la trayectoria (acimut) y perpendicular (profundidad): En el primer caso, la mínima distancia en el terreno entre dos objetos que se diferencien en la imagen depende, como hemos visto, de la anchura horizontal del haz emitido (ϕ) y de la distancia entre la antena y la superficie (d). La anchura horizontal también puede escribirse en función de la longitud de la antena, L_a (fig. 3.15):

$$r_{az} = \frac{d\lambda}{L_a} \qquad [3.2]$$

Aunque en un sistema de abertura sintética la longitud de la antena se incrementa artificialmente, ya que se genera a partir de registrar la señal en dos momentos a lo largo de la trayectoria, la resolución en acimut sigue dependiendo de la distancia al objeto observado. En consecuencia, puesto que la distancia entre objeto y antena cambia desde el extremo más cercano a la traza al más lejano, también cambia la resolución efectiva del píxel en una misma línea de observación. La homogeneización del tamaño precisa, en consecuencia, de correcciones posteriores.

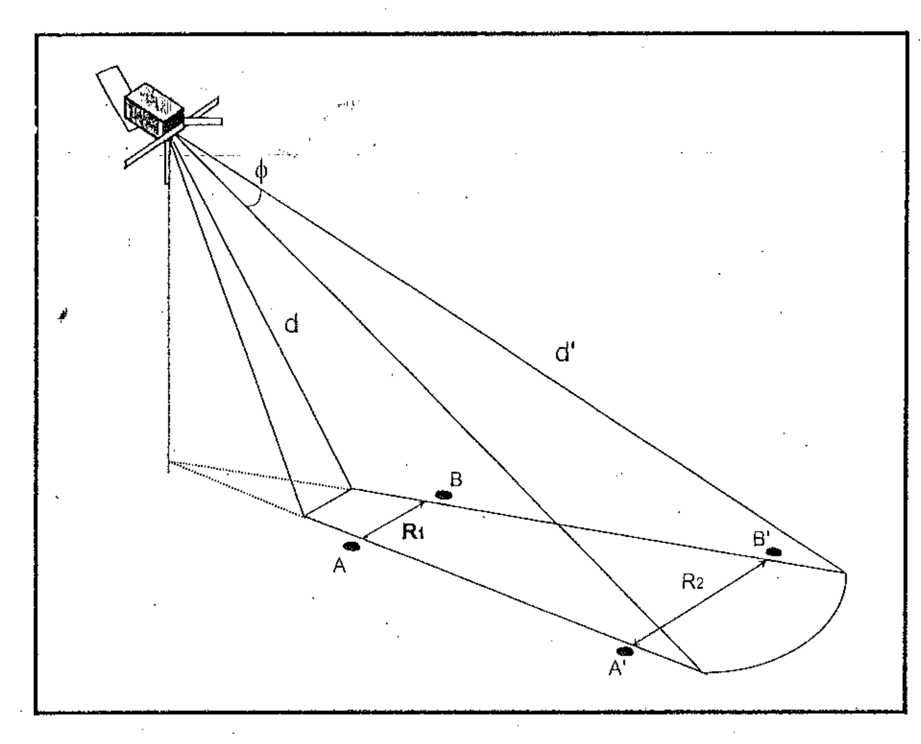


Fig. 3.15 - *Resolución en acimut de un sistema radar (adaptado de Lillesand y Kiefer, 1994)*

Por su parte, la resolución en profundidad depende de la duración de los pulsos emitidos. Para que el sistema pueda discriminar dos objetos, su distancia en el terreno ha de ser superior a la mitad de la longitud del pulso (la mitad porque el pulso tiene que enviarse y regresar). Además hay que considerar que la distancia aparente al radar entre los objetos depende del ángulo de incidencia (θ). Para aumentar la longitud del pulso es preciso disminuir la frecuencia, lo que implica que haya mayor probabilidad de ruido. Esta paradoja se soluciona modulando la frecuencia de los pulsos emitidos y recibidos. En resumen, la resolución en profundidad viene marcada por (fig. 3.16):

$$r_p = \frac{c}{2B\operatorname{sen}\theta} \qquad [3.3]$$

donde c refiere a la velocidad de la luz, B al ancho de banda y θ al ángulo de incidencia de la onda.

En la geometría de adquisición de imágenes radar tiene una gran influencia el relieve, que modifica el ángulo local de incidencia, además de transformar

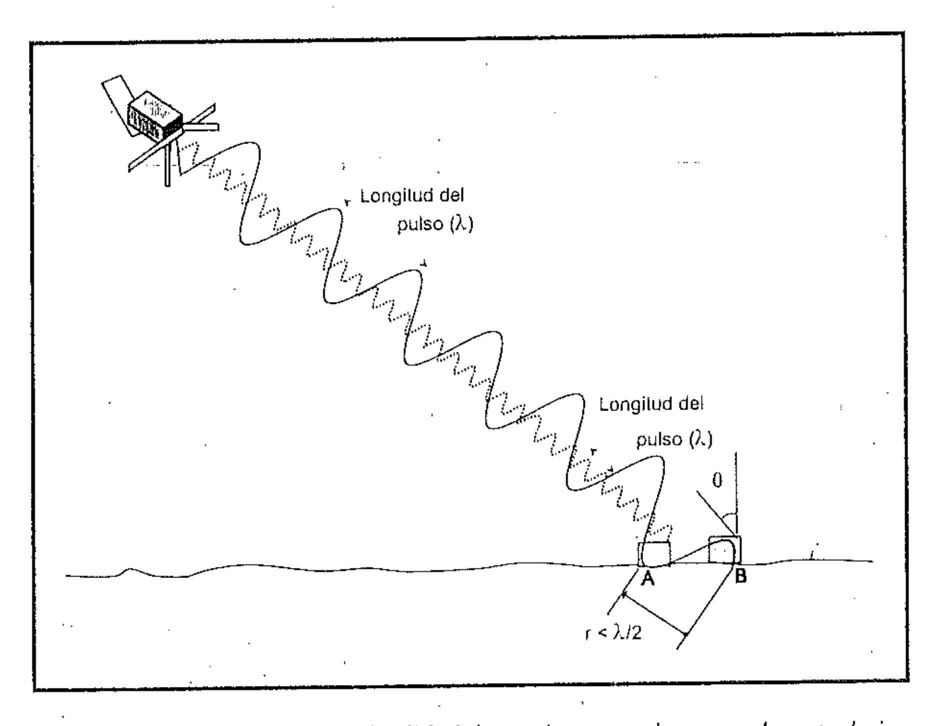


Fig. 3.16 - *Resolución en profundidad de un sistema radar: cuando se trabaja a longitudes de onda más largas, los objetos cercanos tienden a mezclarse en la señal retrodispersada (Cortesía Iksu A. Kyun).*

la superficie real en superficie proyectada sobre la imagen (fig. 3.17). Si la pendiente es menor que el ángulo de incidencia, la imagen ofrece las distancias reales como acortadas. De ahí que las vertientes orientadas hacia la antena aparezcan como inclinadas hacia la dirección de la antena. Otro problema relacionado con el relieve es el efecto de solapamiento inverso (*layover*), que se produce cuando el relieve modifica la posición con la que aparecen dos objetos en la imagen, a consecuencia de que sus ecos lleguen a la antena en forma inversa a su posición respecto a la trayectoria. Estos factores pueden corregirse, posteriormente, si está disponible un modelo digital del terreno de suficiente fiabilidad. Más complicado resulta corregir el efecto del relieve cuando deja en sombra las vertientes opuestas a la dirección de observación. Este fenómeno, que depende de la altitud del terreno y del ángulo de incidencia, implica perder la información de esas laderas, aunque puede recomponerse si el satélite está diseñado para pasar por el mismo

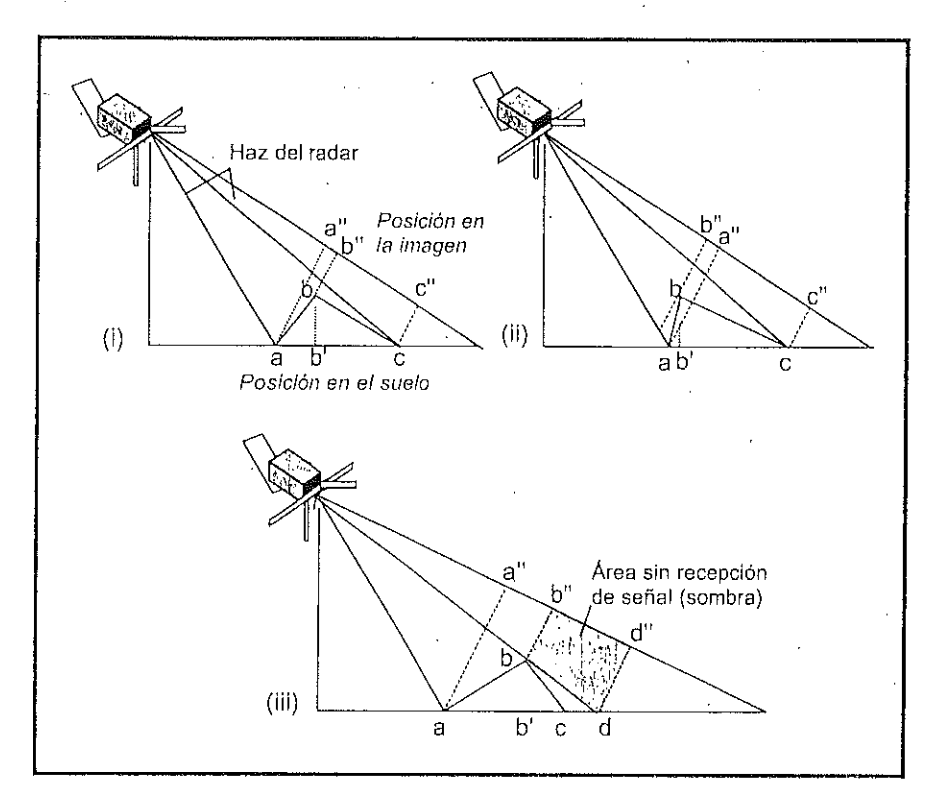


Fig. 3.17 - *Efectos del relieve sobre la imagen radar: (i) las distancias se "acortan" en la imagen cuando el relieve es pronunciado; (ii) si el relieve es extremo, los objetos pueden aparecer en orden inverso a su posición real (solapamiento inverso), (iii) con ángulos de incidencia bajos, no se recibe información de las vertientes contrarias al sentido del flujo (Cortesía Iksu A. Kyun).*

lugar con dos ángulos distintos (pasada ascendente y descendente), como ocurre con el europeo ERS.

En la figura 3.18 aparecen dos imágenes adquiridas por el radar de abertura sintética del ERS-1 con seis días de diferencia. El área corresponde al inicio

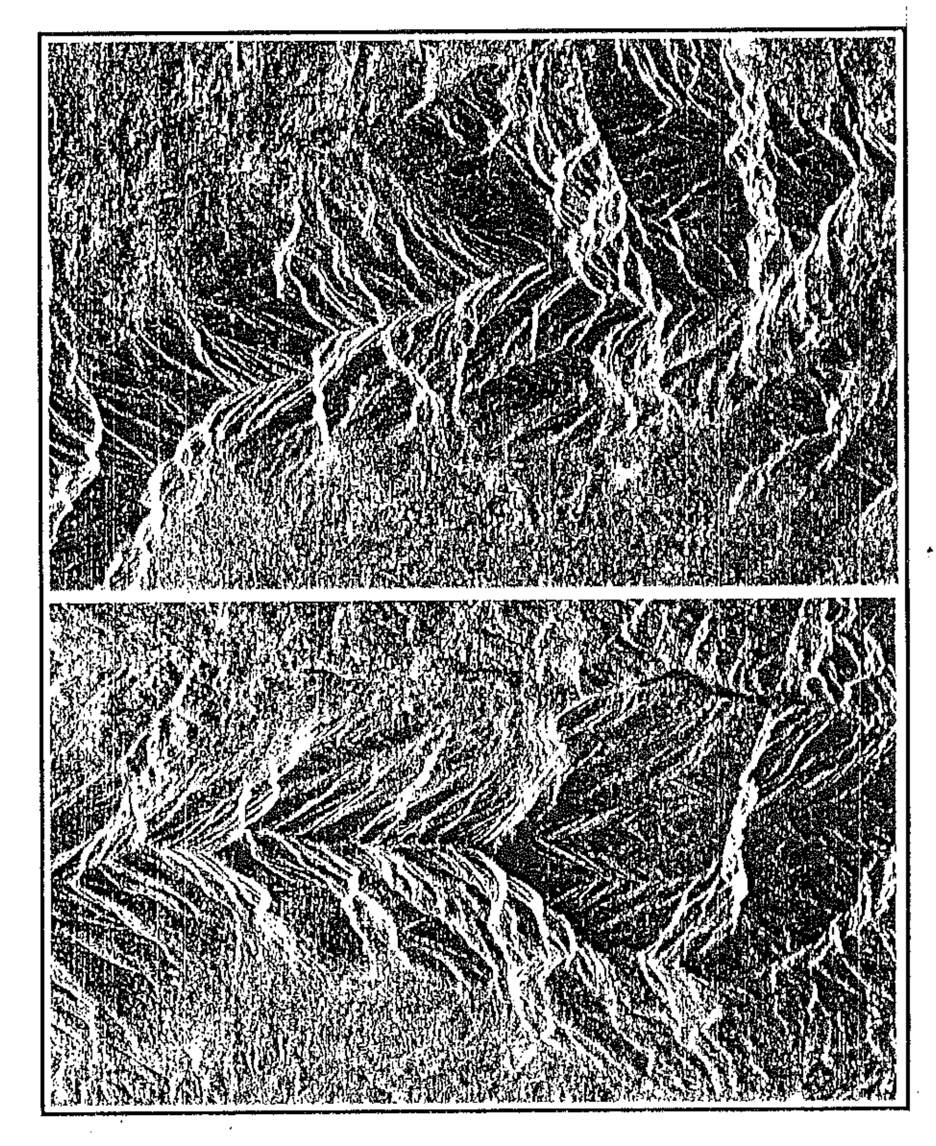


Fig. 3.18 - *Imágenes del SAR del ERS-1 sobre la Sierra de Gredos. En la parte superior, pasada descendente (23 de Abril de 1993); en la inferior, pasada ascendente (29 de Abril de 1993). Producto .PRI (resolución de 25 x 25 m).*

de la Sierra de Gredos, entre las localidades del Tiemblo y Mijares. Al tratarse de un sector con fuertes contrastes topográficos, se observa una notable discrepancia geométrica entre las dos imágenes, que fueron adquiridas en la pasada descendente y ascendente del satélite. Puede observarse cómo el relieve se "tumba" hacia la dirección de la trayectoria.

Pese a sus problemas, el radar de abertura sintética resulta uno de los sensores de mayor desarrollo en las últimas décadas, a consecuencia de su gran versatilidad de observación, ya que es independiente de las condiciones atmosféricas y de la iluminación solar. Por esta razón, se ha incorporado en diversas misiones espaciales, desde la breve experiencia del satélite SEASAT, activo en 1978 para investigación oceanográfica. A él siguieron otras misiones a bordo del transbordador espacial norteamericano (los *Shuttle Imaging Radar*, SIR), y en los últimos años los diseñados por la Agencia Espacial Europea (ERS), la rusa (Almaz), japonesa (JERS-1) y la canadiense (RADARSAT), de los que hablaremos más adelante.

Además del radar de imágenes, estos satélites también han incorporado otros equipos activos de micro-ondas, como el altímetro, que mide con mucha precisión la distancia entre el satélite y la superficie marina, o el dispersómetro de vientos, que mide los campos de vientos (dirección y velocidad) sobre el océano. También hay que citar el creciente desarrollo de las técnicas de interferometría, que permiten generar modelos digitales del terreno de gran precisión a partir de estudiar la diferencia de fase en el pulso radar para dos órbitas sucesivas (Quegan, 1995). Los resultados de estas técnicas, aplicadas a imágenes ERS han sido muy espectaculares, lográndose incluso reconstruir movimientos del terreno muy locales en zonas afectadas por terremotos (fig. 3.19).

3.4.2. Lídar

El lídar (*Light Detection and Ranging*), es un sensor activo que emite pulsos de luz polarizada entre el ultravioleta y el infrarrojo cercano (Kobayashi, 1987; Measures, 1984). En la mayor parte de los sistemas, se emplea como transmisor un láser de pulso y la radiación reflejada es colimada y transmitida a la atmósfera. Esta señal interacciona con las partículas atmosféricas, causando su dispersión en función del tipo de elemento encontrado. La energía de retorno se recoge por un telescopio, que a su vez la transmite a través de un filtro óptico a un foto-detector. Esta señal eléctrica es grabada y posteriormente almacenada en un ordenador. En función del tiempo y la intensidad de la señal de retorno, puede deducirse una información muy significativa sobre el tipo de partículas presentes en la zona de estudio.

Existen distintos sistemas lídar, de acuerdo a los principales tipos de dispersión: de Mie, Rayleigh y Raman, de resonancia, de absorción diferencial, y de

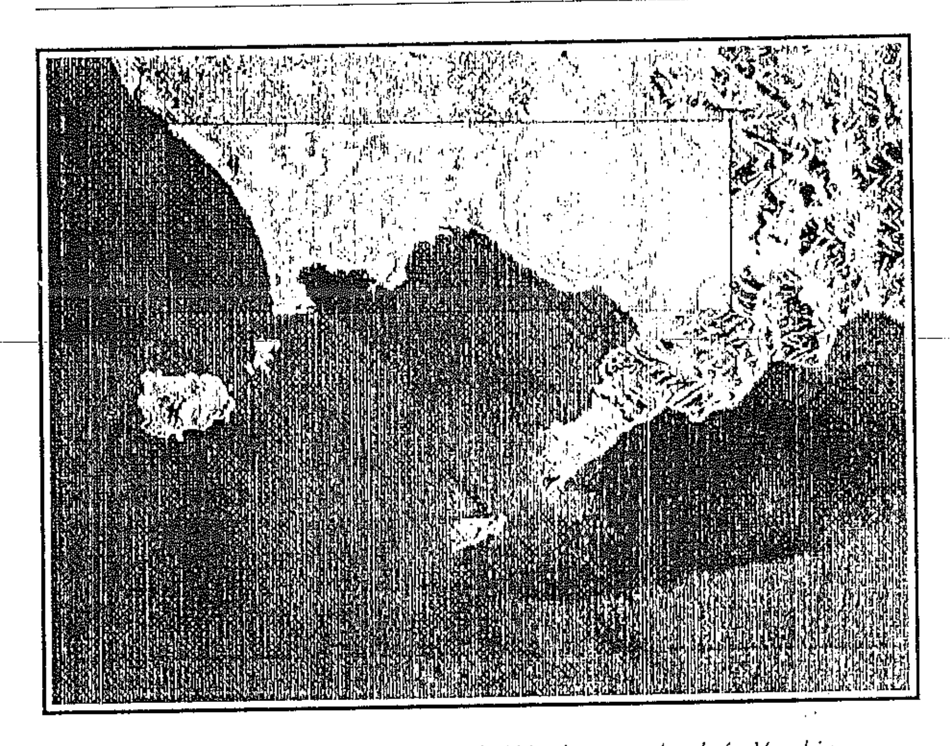


Fig. 3.19 - *Imagen de la Bahía de Nápoles con el volcán Vesubio obtenida fundiendo una imagen ERS-SAR convencional y otra derivada por interferometría, que permite observar la topografía del área. Imagen de la ESA, procesada por F. Rocca, de la Universidad Politécnica de Milán.*

fluorescencia inducida (Kobayashi, 1987). Cada uno de estos tipo se orientan a aplicaciones específicas. Hasta el momento, los más desarrollados son aquellos que intentan explorar situaciones atmosféricas: detección de aerosoles y partículas contaminantes del aire, medición de la humedad, presión y temperatura del aire, y estimación de la velocidad del viento. Las experiencias desarrolladas hasta el momento han ofrecido resultados muy interesantes (Huffaker et al., 1984).

En lo que se refiere a la teledetección de cubiertas terrestres, el lídar más utilizado es el de fluorescencia inducida (Chapelle et al., 1984). Permite detectar manchas de aceite, algas y contaminantes del agua, condiciones de humedad en la vegetación, contenido de pigmentos y cálculos de biomasa. La mayor parte de experiencias desarrolladas hasta el momento se basan en plataformas aéreas (Hoge et al., 1983; Nelson et al., 1988).

Aunque no se trata de un equipo activo, sino pasivo, conviene citar en este epígrafe a los satélites LAGEOS (*Laser Geodynamics Satellite*), lanzados en 1976 y 1992, que incluyen reflectores láser para obtener, con precisión de 1 cm, la

posición del punto terrestre que esté emitiendo hacia él un haz de láser. Su aplicación más directa es el estudio de la deriva continental. En el segundo satélite colabora muy activamente Italia y está más centrado en la medición de la actividad tectónica en el Mediterráneo (Kramer, 1994).

3.5. Plataformas de teledetección espacial

Concluimos este capítulo repasando brevemente las características de los proyectos más interesantes de teledetección desde el espacio. Bajo la óptica de quien pretende obtener información temática de una imagen, este comentario puede ser útil en la medida en que ofrezca un panorama de la información disponible en los distintos proyectos de teledetección espacial[3].

Antes de iniciar este comentario, conviene hacer una clasificación elemental de los tipos de plataforma disponibles en función de su órbita, los denominados geosíncronos y heliosíncronos. Los primeros, que también se denominan geoestacionarios, están colocados en órbitas muy altas, lo que les permite sincronizarse al movimiento de rotación de la Tierra, y observar siempre la misma zona (figura 3.20). Además, al contar con un campo amplio de visión pueden observar, en una sola imagen, el disco completo de la Tierra que sea visible desde la longitud a que se encuentren. Éste es el caso de los satélites Meteosat o GOES, situados a unos 36.000 km sobre el Ecuador, a la longitud más apropiada para el área que pretenden observar. En el primer caso, sobre el meridiano 0° (para adquirir imágenes de Europa) y en el segundo sobre los meridianos 70° y 140°, enfocados hacia la costa Este y Oeste, respectivamente, de EE.UU. Al estar siempre situados sobre la misma posición relativa a la Tierra, los satélites geoestacionarios proporcionan la mejor resolución temporal posible.

Por contraposición a éstos, se habla de plataformas *«móviles»*, como aquellas que observan sistemáticamente distintas zonas del planeta. Aunque la órbita puede ser elíptica, lo normal es que sea circular, a fin de mantener en lo posible la misma altura de observación para que las imágenes obtenidas sean comparables. Estas órbitas suelen ser polares (es decir, el plano de la órbita del satélite es aproximadamente perpendicular al plano del Ecuador terrestre), con el propósito de aprovechar el movimiento de rotación del planeta a fin de que la plataforma se sitúe sobre un mismo punto cada cierto tiempo: si la Tierra rota de Oeste a Este, y la plataforma orbita de Norte a Sur de manera constante, ésta podrá observar el mismo punto de la Tierra transcurrido un tiempo que dependerá

[3] Un análisis exhaustivo de las características técnicas de las misiones espaciales de teledetección puede revisarse en Kramer (1994, segunda edición).

de la velocidad y la altura de la órbita. Habitualmente, tanto la altura como la velocidad de la plataforma se calculan para que ésta observe cada porción de la Tierra a una hora solar fija (las órbitas que persiguen este objetivo se denominan heliosíncronas, figura 3.21).

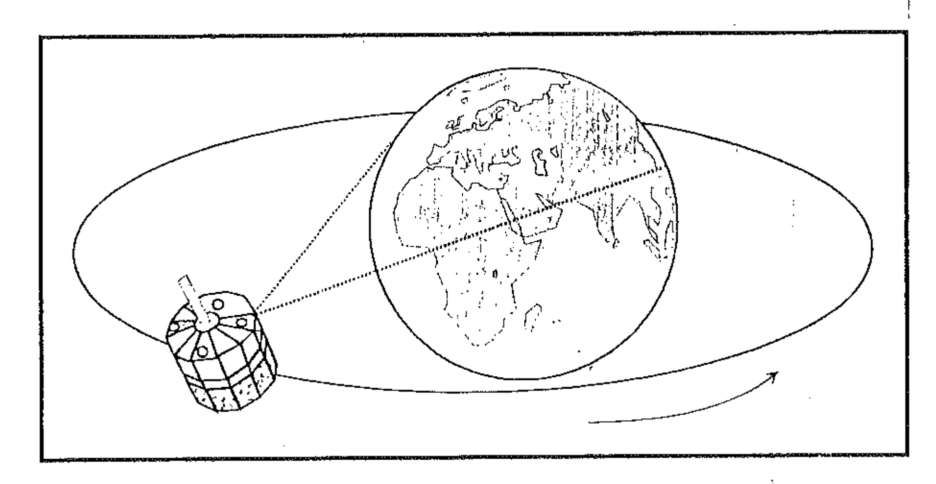


Fig. 3.20 - *Esquema de la operación de un satélite geoestacionario*

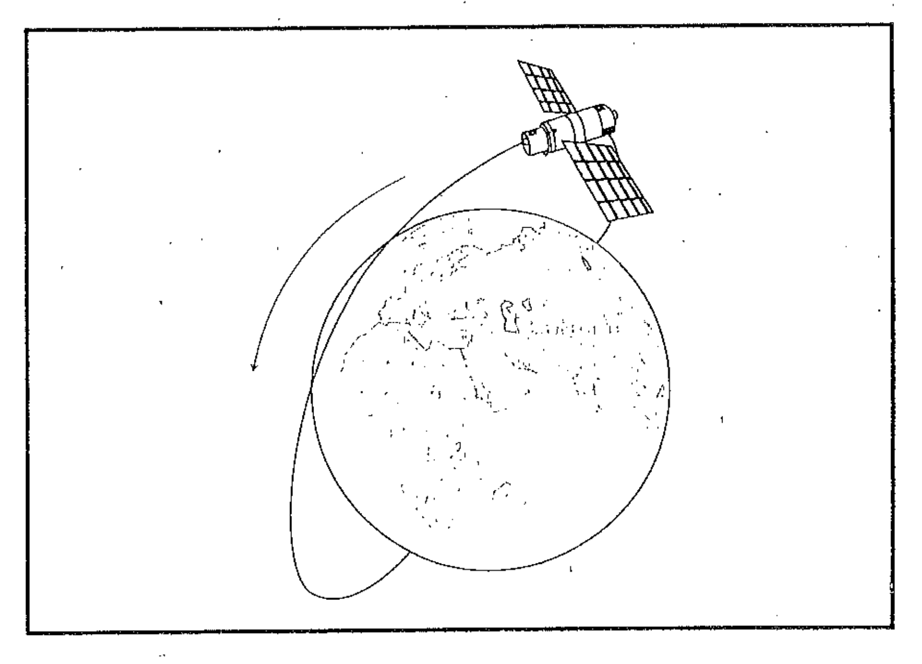


Fig. 3.21 - *Esquema de la operación de un satélite heliosíncrono*

La elección de la órbita que ocupa una plataforma viene determinada por las características de la misión del satélite: si se pretende tomar datos de una gran superficie en una sola imagen a fin de observar fenómenos globales y muy dinámicos (como la nubosidad), se trabaja con satélites geoestacionarios —o, en todo caso, con polares que cuenten con un amplio campo de visión—; por el contrario, si se pretende un mayor detalle en la observación, se utilizan plataformas heliosíncronas.

3.5.1. El programa Landsat

Gracias a los brillantes resultados que proporcionaron las primeras fotografías espaciales, la agencia espacial norteamericana diseñó a fines de la década del 60 el primer proyecto dedicado exclusivamente a la observación de los recursos terrestres.

Fruto de estos trabajos fue la puesta en órbita del primer satélite de la serie ERTS (*Earth Resource Technollogy Satellite*) el 23 de julio de 1972. Esta familia de satélites, denominada Landsat a partir del segundo lanzamiento, en 1975, ha constituido, sin duda, el proyecto más fructífero de teledetección espacial desarrollado hasta el momento. La buena resolución de sus sensores, el carácter global y periódico de la observación que realizan y su buena comercialización, explican su profuso empleo por expertos de muy variados campos en todo el mundo. Sólo hasta 1980, la cobertura territorial proporcionada por los diversos satélites de la serie se cifraba en unos 32.000 millones de km², alcanzando la cifra de 385.000 las imágenes adquiridas por estaciones estado-unidenses, y 560.000 las recibidas por estaciones foráneas (Brasil, Canadá, China, Italia, Suecia, Irán, Japón, India, Argentina, Sudáfrica y Australia: Colwell, 1983, pp.517-570). Estos datos bastan por sí solos para valorar la importancia de este proyecto espacial, y justifican un detallado análisis en el marco de esta obra.

3.5.1.1. Características orbitales

Los primeros tres satélites Landsat tenían un aspecto muy similar al del Nimbus, en forma de mariposa por la disposición de los paneles solares (fig. 3.22). Sus dimensiones eran de 3 m de altura por 1,5 m de diámetro, que se tornaban en 4 m cuando se extendían dichos paneles. El peso total del sistema se aproximaba a los 960 Kg. Su órbita era heliosíncrona, polar, ligeramente inclinada (99,1 grados). Con una altura orbital media de 917 km, circundaba la tierra cada 103 minutos, con lo que realizaba 14 órbitas diarias para volver sobre la misma porción de la superficie terrestre a los 18 días, y a la misma hora local (entre las 9,30 y las 10,30 a.m. según latitudes). Con el fin de reducir al máximo las alteraciones en las condiciones de observación se dotó a los satélites de un sistema de estabilización

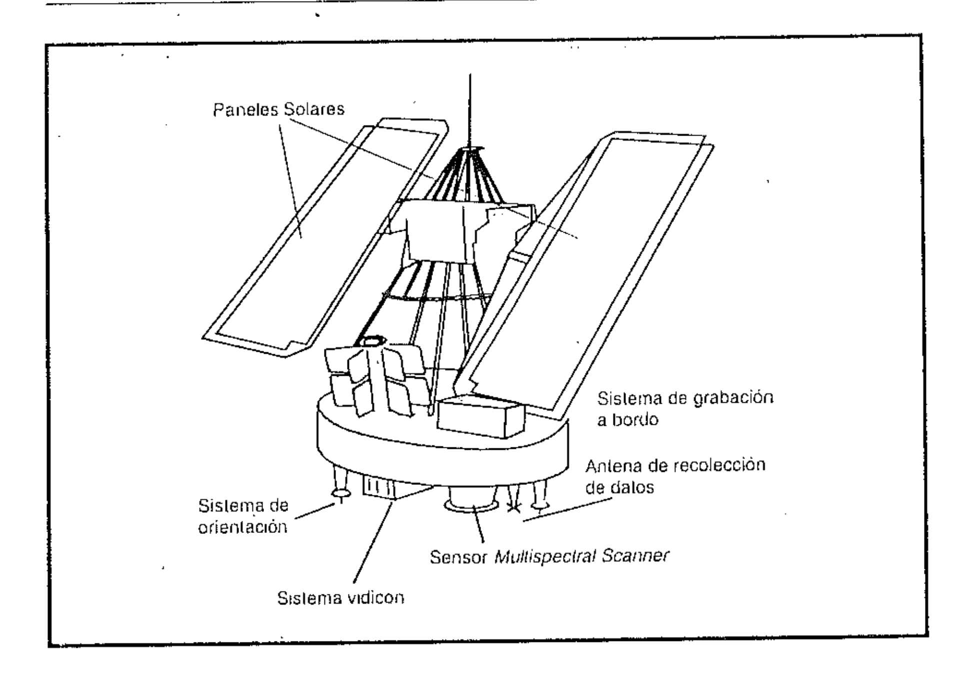


Fig. 3.22 - *Configuración de los satélites Landsat-1 a 3*

según tres ejes, orientados hacia la superficie terrestre y la vertical del punto nadir. Las correcciones en la órbita, por tanto, se hacían desde las estaciones terrestres, lo que confería una gran estabilidad en la toma de datos.

Los dos últimos satélites, el Landsat-4 y 5, modifican su fisonomía (fig. 3.23) y sus características orbitales. La altura de vuelo se reduce de 917 a 705 km, aunque se mejora el ciclo de recubrimiento, de 18 a 16 días en nuestras latitudes, gracias a un menor período orbital (98,9 minutos). El momento de adquisición, sin embargo, se mantiene en torno a las 9.45 a.m., hora solar en nuestras latitudes.

3.5.1.2. Instrumentos de observación

3.5.1.2.1. Sensor MSS

Los primeros Landsat incorporaban un equipo de barrido multi-espectral denominado MSS (*Multispectral Scanner*) y un conjunto de tres cámaras de vídeo (RBV, *Return Beam Vidicon*). Los dos últimos, eliminan las cámaras y las sustituyen por un nuevo explorador de barrido, denominado TM (*Thematic Mapper*) que proporciona mayor resolución espacial y espectral que el previo MSS. Para asegurar la continuidad en la serie de datos, se ha mantenido el MSS en los dos últimos Landsat, con similares características a los anteriores satélites.

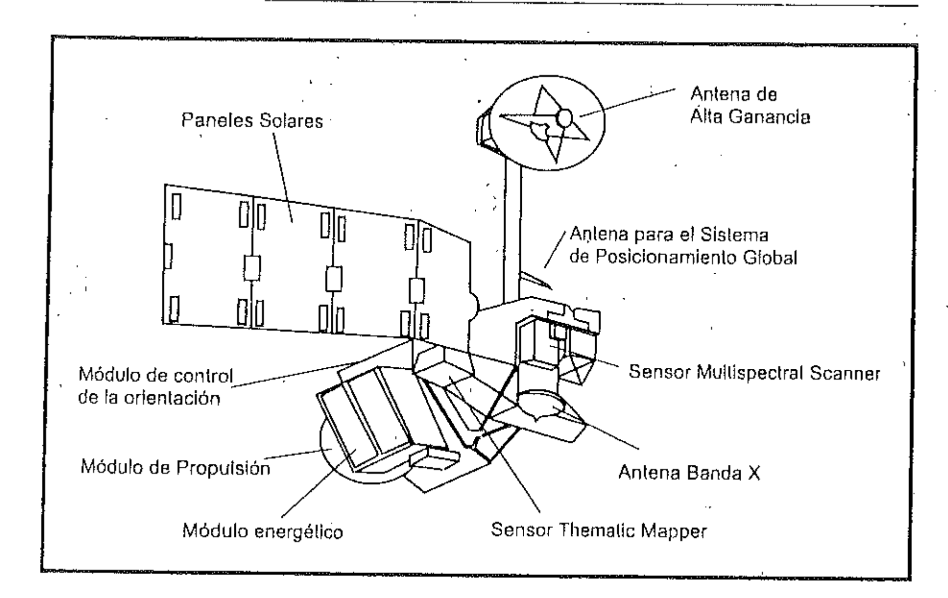


Fig. 3.23 - *Configuración de los Landsat-4 y 5*

En definitiva, el MSS ha sido el sensor más empleado hasta el momento, gracias a la larga serie de imágenes disponibles, desde 1972 hasta la actualidad. El sensor MSS es un equipo de barrido óptico-electrónico. Su campo total de visión es de 11,56 grados, lo que, a la altura orbital del satélite, le permite explorar una franja de terreno de 185 km, divididos a ambos lados de la vertical de la traza.

En el diseño del sensor MSS se tuvieron en cuenta las medidas espectrales de laboratorio, de tal forma que las 4 bandas finalmente incluidas pretendían realzar la aplicación de este sensor a la detección de masas vegetales, recursos hídricos y mineros (tabla 3.1). Las bandas visibles (4 y 5), tienen mejores disposiciones para la detección de aspectos antrópicos, como áreas urbanas o vías de comunicación, a la vez que proporcionan una interesante información sobre la calidad del agua. Las dos bandas en el infrarrojo cercano (6 y 7) pretenden registrar parámetros vitales en la actividad de las plantas, además de ser especialmente sensibles a la humedad.

Con objeto de acoplar la secuencia de barrido a la velocidad del satélite, el sensor MSS registra seis líneas simultáneamente con cada oscilación del espejo. La radiancia recibida por el sistema focal se transmite a una sistema óptico que la descompone en cuatro bandas, y la envía a distintos detectores. Por tanto, el MSS dispone de 24 detectores (6 líneas x 4 bandas), compuestos por foto-diodos de silicio (banda 7), y por tubos foto-multiplicadores (bandas 4 a 6). En el caso del Landsat-3, se añadió una banda térmica (banda 8), registrada por detectores de

MSS		RBV		TM[1]	
4	(0,5 - 0,6 µm)	1[2]	(0,475 - 0,575 µm)	1	(0,45 - 0,52 µm)
5	(0,6 - 0,7 µm)	2[2]	(0,580 - 0,680 µm)	2	(0,52 - 0,60 µm)
6	(0,7 - 0,8 µm)	3[2]	(0,690 - 0,830 µm)	3	(0,63 - 0,69 µm)
7	(0,8 - 1,1 µm)	1[3]	(0,505 - 0,750 µm)	4	(0,76 - 0,90 µm)
8[3]	(10.4 - 12.6 µm)			5	(1,55 - 1,75 µm)
				6	(10,40 - 12,50 µm)
				7	(2,08 - 2,35 µm)
	Resolución espacial				
4-7	79 m	1-3[2]	80 m	1-5, 7	30 m
8[3]	240 m	1[3]	40 m	6	120 m

[1] Sólo en los Landsat-4 y 5
[2] Sólo en los Landsat-1 y 2
[3] Sólo en el Landsat-3

Tabla 3.1 - *Sensores a bordo del programa Landsat*

mercurio-cadmio-telurio. La cobertura espectral ofrecida por el MSS aparece en la tabla 3.1.

Las señales analógicas que producen los detectores son amplificadas, convertidas a formato digital y enviadas directamente a las estaciones receptoras, desde donde se inicia la distribución de las imágenes. Cuando el satélite no se encontraba en el área de influencia de alguna antena terrestre, los primeros Landsat incorporaban un sistema de grabación a bordo denominada WBVTR (*Wide Band Video Tape Recorders*), que permitió adquirir imágenes de estas áreas. En los dos últimos satélites, el flujo de información es tan grande que requieren una red de satélites de comunicación (TDRSS) para enviar a Tierra las imágenes detectadas. Esto ha impulsado aún más el establecimiento de una red de antenas receptoras que hoy cubren prácticamente el conjunto de la superficie terrestre. En el caso de España, la antena receptora se encuentra en Fucino, muy próxima a Roma, para el territorio peninsular, y en Maspalomas para la cobertura de las islas Canarias y Africa Occidental.

Una escena adquirida por el sensor MSS comprende 2.340 líneas de barrido y 3.240 columnas por línea. Cada píxel corresponde a una superficie real de 79 m de lado (0,62 Ha), si bien en la transformación digital se le asigna un formato nominal de 57 x 79 m, lo que explica la disimetría final entre el número de líneas y de columnas en la imagen. La radiancia recibida para esa parcela del terreno se transforma a un valor entero, para su almacenamiento en CCT. Ese valor, en los primeros MSS, estaba comprendido entre 0 y 127 para las bandas 4 a 6, y entre 0

y 63 para la banda 7. Los actuales MSS codifican las cuatro bandas entre 0 y 255, la medida estándar en un equipo de tratamiento digital.

3.5.1.2.2. Sistema Vidicón

Los dos primeros satélites Landsat incorporaron un sistema de tres cámaras RBV, cada una de las cuales registraba información en una banda espectral comprendida entre el verde y el infrarrojo cercano (tabla 3.1). Su resolución espacial se cifraba en 80 m, cubriendo la misma porción superficial del sensor MSS.

Este sistema no funcionó adecuadamente en los dos primeros Landsat, por lo que fue sustituido en el tercero por otro. En este caso, el planteamiento se dirigió más a mejorar la resolución espacial que la espectral, por lo que se montaron dos cámaras pancromáticas de alta resolución operando simultáneamente con el MSS. Estas cámaras cubrían un abanico espectral de 0,505 a 0,705 μm, proporcionando —en cuatro adquisiciones— la misma cobertura del MSS, pero con una resolución aproximada de 40 m. El registro entre ambas permitió utilizar el RBV como auxiliar del MSS, especialmente para mejorar la calidad visual de sus imágenes. Para ello, se emplearon diversas técnicas de fusión, como la normalización de las bandas MSS, a partir de la proporcionada por RBV (Short, 1982), o la transformación IHS (cap. 6.6).

En el campo de las aplicaciones temáticas, el RBV se ha utilizado en estudios morfológicos (Tricart, 1981) y en cartografía de la cubierta del suelo (King, 1981), si bien la escasa pervivencia de este sensor ha reducido sensiblemente su rango de aplicaciones.

3.5.1.2.3. Sensor Thematic Mapper (TM)

Como antes se indicó, el lanzamiento de los dos últimos satélites ha supuesto un notable impulso del programa Landsat. Su principal aportación consiste en incorporar un nuevo sensor, denominado *Thematic Mapper* (TM), directamente diseñado —como su nombre indica— para la cartografía temática.

Al igual que su predecesor, el MSS, el *Thematic Mapper* es un equipo de barrido multi-espectral, que emplea una técnica muy similar a la descrita previamente. Sin embargo, las novedades que incorpora permiten considerarlo como perteneciente a una nueva generación de sensores. Frente al MSS, el TM aumenta el número de detectores, de 24 a 100, a la vez que se reduce el IFOV, se aumentan los niveles de codificación y se realiza el barrido en las dos direcciones. Todo ello le permite mejorar la resolución espacial, espectral y radiométrica: de 79 a 30 m, de 4 a 7 bandas, y de 6 a 8 bits. En el TM, cada oscilación del espejo supone 16

líneas de barrido, frente a 6 en el MSS. De esta forma se precisan 16 detectores por banda, salvo la banda térmica que registra una menor resolución (120 m) y sólo requiere cuatro detectores. Este aumento en el número de detectores complica el proceso de calibración, a la par que aumenta el volumen de datos a procesar frente al MSS. Los detectores están formados por tubos de silicio, para las bandas 1 a 4, indio-antimonio para las bandas 5 y 7, y mercurio-cadmio-telurio para la banda 6.

El incremento de la resolución espacial y espectral que ofrece el TM, facilita una mayor precisión para la cartografía temática, mientras permite ampliar el rango de aplicaciones operativas a partir de sensores espaciales. En este sentido, el diseño del TM pretendió paliar las deficiencias observadas en las imágenes MSS, incorporando información de cuatro bandas del espectro no contempladas en el MSS (azul, dos en el infrarrojo medio y una en el térmico), mientras se sustituían las bandas 6 y 7 de ese sensor —ambas en el infrarrojo cercano— por una sóla, sin perder información sustancial (tabla 3.1)

Con esa nueva configuración, el TM permite una sensible mejora en las aplicaciones terrestres y marinas sobre el sensor MSS: detección de turbideces y contaminantes en el agua (banda azul), exploración minera (infrarrojo medio), contenidos de humedad en las plantas y suelo (infrarrojo medio), detección de focos de calor (infrarrojo medio y térmico), además de mantener las aplicaciones antes señaladas para el sensor MSS.

Tal vez su principal problema radica en su coste y en el volumen de datos que ofrece. A modo de referencia, baste indicar que una escena completa del sensor TM septuplica el coste de una adquirida por el MSS (sobre el mismo territorio), mientras el volumen de datos que incluye alcanza los 231 millones de píxeles, frente a los 28 millones de una imagen MSS. Esto ha llevado a comercializar cuartos de escena (100 x 100 km), bandas aisladas y miniescenas (50 x 50 km), aunque en el momento presente, las nuevas tecnologías de almacenamiento masivo estén aliviando el problema (ver cap. 6.3).

3.5.1.3. El futuro del programa Landsat

La amplitud temática y geográfica de los usuarios del programa Landsat explica el gran interés que existe en la comunidad científica internacional por el futuro de esta familia de satélites. La Administración Reagan impulsó la transferencia del programa Landsat al sector privado en 1984 (OTA, 1984). Pocos meses más tarde, en 1985, la compañía EOSAT recibía los derechos para vender productos Landsat por un período de 10 años, con el compromiso de participar en el desarrollo de futuros sensores. Por su parte, el gobierno mantenía la responsabilidad en el control físico de la plataforma, mientras que se comprometía a colaborar en el desarrollo de los Landsat-6 y 7. Nuevos recortes presupuestarios pusieron en

entredicho este compromiso, hasta el punto de llegar a una situación límite, a inicios de 1989, en el que se temió por la continuidad de los propios Landsat-4 y 5, en este momento en órbita.

Ante las numerosas presiones de la comunidad científica y profesional, el *National Space Council* presidido por el Vicepresidente Quayle, rectificó en 1992 el rumbo de los acontecimientos, asegurando una financiación estable para los satélites en funcionamiento y un compromiso para el desarrollo de los futuros Landsat-6 y 7 en la década de los 90. Diversos problemas presupuestarios retrasaron el lanzamiento del Landsat-6 hasta 1993. Desafortunadamente, un fallo en el sistema de comunicaciones impidió contactar con el satélite y ponerlo en la órbita precisa, con lo que se perdió irremediablemente. Si a este desastre se une el dudoso éxito de la gestión privada del satélite, se comprende la situación de incertidumbre que ha vivido últimamente este programa. La nueva administración demócrata ha impulsado notablemente los programas de investigación ambiental, lo que ha beneficiado a las políticas de Observación de la Tierra. A través de la *Land Remote Sensing Policy Act* de 1992 se transfería de nuevo el programa Landsat a la administración pública, dividiéndose las competencias entre NASA, el departamento de comercio (Agencia NOAA) y de Defensa (OTA, 1993). A través de esa ley, parece que se mantiene el compromiso para construir el Landsat-7, previsto para lanzamiento en 1997-98, que copiará los rasgos del fallido Landsat-6. Presentará una nueva fisonomía, nuevas condiciones orbitales y sensores a bordo. Aunque siguen los estudios al respecto, parece confirmado que seguirá incluyendo una versión mejorada del TM, denominada *Enhanced Thematic Mapper* (ETM), que incorporará una banda pancromática (0,50 - 0,90 μm), con una resolución espacial de 15 m. También se encuentra en estudio un nuevo sensor, denominado *High Resolution Multispectral Stereo Imager* (HRMSI), con resolución de 5 m y capacidad para cambiar el ángulo de observación, lo que permitiría cobertura estereoscópica y reducir, si fuera preciso, la resolución temporal a 3 días. Los costes estimados del programa Landsat son 880 millones de $ para la gestión, 398 millones para la construcción del ETM y 403 millones para el HRMSI (OTA, 1993).

3.5.2. El satélite SPOT

Uno de los programas de teledetección espacial más novedoso, frente al estándar marcado por el programa Landsat, ha sido el proyecto SPOT (*Système Pour l'Observation de la Terre*), desarrollado por el CNES francés, en colaboración con Bélgica y Suecia. Hasta el momento se han lanzado tres satélites SPOT, en 1986, 1990 y 1993 y el próximo lanzamiento se espera para 1997.

Entre las novedades más interesantes de este satélite, se cuenta la incorporación de dos equipos de exploración por empuje denominados HRV (*Haute Resolution Visible*). Estos dos sensores permiten obtener imágenes en dos modalidades: pancromático y multibanda (verde, rojo e infrarrojo cercano), con una resolución espacial de 10 y 20 m, respectivamente (tabla 3.2). El área cubierta en cada escena es de 60 km de lado, por lo que estos sensores necesitan incorporar 3.000 detectores en modo multi-espectral y 6.000 en modo pancromático.

Otra importante novedad del satélite SPOT es la capacidad del HRV para variar su campo de visión, gracias a un dispositivo móvil instalado en el equipo óptico que facilita observaciones no verticales, de hasta 27 grados a ambos lados del nadir. Esto le permite observar la misma zona en órbitas sucesivas, reduciendo la frecuencia temporal de las imágenes si es necesario (de 26 días a 2-3 días según las latitudes). Además, con esa misma aptitud, el HRV puede adquirir imágenes estereoscópicas, lo que añade a su potencial temático una clara capacidad topográfica (fig. 3.24). Las experiencias realizadas hasta el momento han permitido obtener modelos digitales del terreno con escalas de hasta 1:50,000, a partir de imágenes SPOT, por lo que pueden categorizarse como muy precisas (Jensen, 1996; Toutin y Beaudoin, 1995). En definitiva, la flexibilidad del sistema le facilita adaptar su órbita a las necesidades del usuario (Chevrel et al., 1981; Brachet, 1986).

La mejora en resolución espacial frente al sensor TM hace a las imágenes SPOT-HRV idóneas para tareas de análisis visual, especialmente en el medio urbano, así como para derivar imágenes de textura, mucho más detalladas que las ofrecidas por el TM (Cohen y Spies, 1992). Asimismo se han desarrollado técni-

	HRV - SPOT	
Banda	**Amplitud**	**Resolución**
XS1	0,50 - 0,59 mm	20 metros
XS2	0,61 - 0,68 mm	20 metros
XS3	0,79 - 0,89 mm	20 metros
P	0,51 - 0,73 mm	10 metros
	Vegetation	
B0	0,43 - 0,47	1 km² en el nadir
B1	0,50 - 0,59	
B2	0,61 - 0,68	
B3	0,78 - 0,89	
B4	1,58 - 1,75	

Tabla 3.2 - *Sensores a bordo del satélite SPOT*

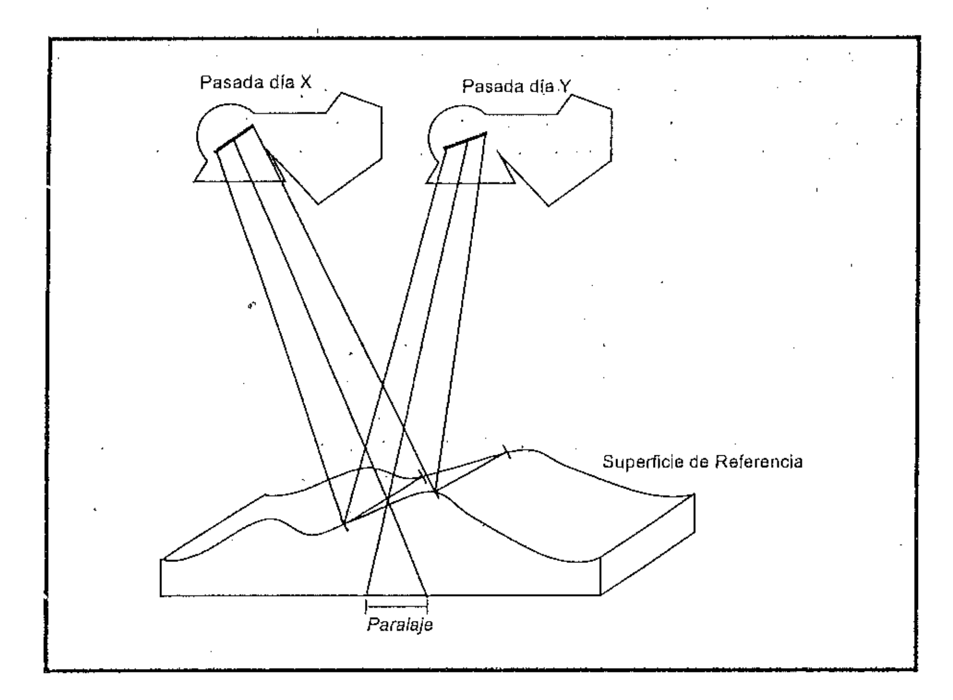


Fig. 3.24 - *Sistema de adquisición de imágenes estereoscópicas que realiza el satélite SPOT*

cas para combinar el canal pancromático de SPOT con imágenes TM (ver 6.6.4), de tal forma que se aproveche la resolución espectral de este último, recogiendo de alguna forma la resolución espacial del primero.

Además del sensor HRV, los satélites SPOT incorporan dos equipos de apoyo, el DORIS, que proporciona un seguimiento muy preciso de la posición del satélite, y el POAM (*Polar Ozone and Aerosol Measurement*), incorporado en el SPOT-3, que mide el contenido de ozono, aerosoles, nitrógeno, oxígeno y vapor de agua. Posee 9 canales comprendidos entre el ultravioleta e infrarrojo cercano (Kramer, 1994).

En el momento de redactar este epígrafe, SPOT Image, la empresa responsable de la distribución de imágenes SPOT, tiene acuerdos con 14 antenas receptoras, que cubren la mayor parte del mundo, haciendo esta información cada vez más atractiva para múltiples aplicaciones. Lamentablemente, las imágenes no se toman de modo sistemático, sino a petición del cliente, lo que en ocasiones dificulta el empleo de estos datos para análisis multitemporal.

El próximo satélite SPOT, además de cambiar algunos aspectos de la plataforma, muy probablemente incorporará un nuevo instrumento, denominado

Vegetation, orientado al inventario global de las cubiertas vegetales (tabla 3.2). Las características de este sensor son muy similares a las del AVHRR del NOAA, que comentaremos en breve. Poseerá bandas en el azul, verde, rojo, infrarrojo cercano y medio, con una resolución de 1 km² en el nadir y un campo de visión total de unos 2.200 km. Además, el SPOT-4 incorporará un sensor de alta resolución mejorado, HRVIR, con una nueva banda en el infrarrojo medio. De esta forma, podrá abordarse con mayor facilidad la integración entre imágenes de alta y baja resolución para calibrar modelos globales.

3.5.3. Tiros-NOAA

Esta familia de satélites, constituye uno de los múltiples programas diseñados para enviar información meteorológica a la superficie terrestre. Los satélites meteorológicos, los únicos que pueden calificarse como plenamente operativos hasta el momento presente, se desarrollaron a partir de 1960 con el lanzamiento del satélite TIROS-1. Continuación de esta serie es la denominada NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration Satellite*), nombrada así a partir del sexto satélite, que se lanzó en 1979.

Teniendo en cuenta que el principal objetivo de este programa era facilitar información sobre el estado actual de la atmósfera, el satélite NOAA se diseñó para ofrecer un ciclo de cobertura muy corto: una imagen cada doce horas en nuestras latitudes. Este ciclo se mejora a seis horas gracias a la sincronización entre los dos satélites que operan simultáneamente. Su altura orbital es de 833 a 870 km, cubriendo en una imagen un área aproximada de 3.000 km de lado.

En lo que se refiere a aplicaciones terrestres, el sensor más interesante del programa NOAA es el denominado AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*), diseñado para proporcionar imágenes con una resolución de 1,1 km (en el nadir), en 5 bandas del espectro (rojo, infrarrojo cercano, medio y térmico: tabla 3.3). Los NOAA con numeración par (en este momento el NOAA-12) obtienen imágenes aproximadamente a las 7,30 y 19,30 horas, mientras los

Banda	Amplitud (µm)	Región Espectral
1	0,58 - 0,68	Rojo
2	0,72 - 1,10	Infr. cercano
3	3,55 - 3,93	Infr. medio
4	10,30 - 11,30	Infr. térmico
5	11,50 - 12,50	Infr. térmico

Tabla 3.3 - *Características del sensor AVHRR - NOAA*

impares (actualmente el NOAA-13) lo hacen a las 14,30 y 2,30 horas, si bien se produce una degradación de la órbita desde el año de lanzamiento, que conviene tener en cuenta para homogeneizar adecuadamente las series temporales (Privette et al., 1995).

Para asegurar esta frecuencia de adquisición, el AVHRR cuenta con un ángulo de barrido muy amplio (55,4° a ambos lados de la traza), lo que implica notables problemas geométricos y radiométricos en las imágenes resultantes. De esta forma, la resolución espacial del nadir (1,1 x 1,1 km) puede degradarse hasta 2,4 x 6 km en los extremos de la imagen. Esto añadido a los problemas de contaminación atmosférica de los píxeles extremos desaconseja el empleo de los sectores de la imagen que excedan 30° del nadir (Goward et al., 1991).

Las imágenes AVHRR se presentan en tres diferentes formatos: la máxima resolución es denominada LAC (*Local Area Coverage*), cuando se graba a bordo, o HRPT (*High Resolution Picture Transmission*), cuando se envía en tiempo real a las estaciones receptoras. Puesto que el sistema de grabación del NOAA es bastante reducido, normalmente sólo se almacena a bordo un producto de menor resolución, llamado GAC (*Global Area Coverage*), con un tamaño de píxel de 4 x 4 km, que se genera a partir de un muestreo de los datos LAC. Por último, también se produce semanalmente un producto denominado GVI (*Global Vegetation Index*), calculado a partir de los canales infrarrojo cercano y rojo, para un píxel de 16 km de lado (Kidwell, 1991; Belward, 1991).

Gracias a su buena cobertura temporal y bajo coste —las imágenes son de libre recepción—, el sensor AVHRR se ha utilizado profusamente en los últimos años, no sólo para aplicaciones climáticas u oceanográficas, sino también para aplicaciones terrestres (Ehrlich et al., 1994). Lógicamente, su resolución espacial no permite emplearlo en estudios de detalle, pero sí resulta muy fructífero para escalas globales (Chuvieco, 1992a). Al proporcionar información del visible, infrarrojo cercano y térmico, permite seguir las condiciones de la vegetación en períodos cortos de tiempo y a escala global, lo que le hace idóneo para estudiar fenómenos muy dinámicos como la desertificación (Tarpley et al., 1984), la deforestación tropical (Tucker et al., 1984; Malingreau, 1991; Holben y Shimabukuro, 1993), o los incendios forestales de gran magnitud (Chuvieco y Martín, 1994a; Matson y Holben, 1987; Flannigan y Vonder Haar, 1986). Asimismo, se está empleando para obtener mapas de la cobertura del suelo a escala continental (Tucker et al., 1985; Townshend et al., 1987; Goward et al., 1987; Lloyd, 1989; Goward, 1989; Brown et al., 1993), y para el inventario de cosechas (Philipson y Teng, 1988; Teng, 1990; Guerif et al., 1993; Kerdiles y Grondona, 1995).

Un magnífico ejemplo de imagen AVHRR-NOAA se incluye en la figura 3.25*. Corresponde a la práctica totalidad del continente europeo. En lo que a

nuestro país afecta, resulta muy expresivo la diferencia de tonalidad frente a los países del centro y norte de Europa, así como el contraste entre el Norte (más vigoroso) y el Sur (más seco) de la península. Este contraste sólo se interrumpe por la cubierta forestal de las alineaciones montañosas interiores, como el Sistema Central o los Montes de Toledo.

3.5.4. Satélites meteorológicos

Con la excepción del NOAA y Nimbus, la mayor parte de los satélites meteorológicos son de órbita geoestacionaria, ya que se dirigen a observar un fenómeno de gran radio de acción y de modo muy frecuente. Este es el caso de los satélites Meteosat, GOES, GMS, Insat y GOMS. Los tres primeros forman una red de observación meteorológica, que cubre el conjunto del planeta, y se coordina por la organización meteorológica mundial, a través de su programa *GARP (Global Atmospheric Research Programme)*.

El primer satélite geoestacionario se lanzó en 1966 por la NASA, denominándose ATS (*Applications Technollogy Satellite*). En forma operacional, este satélite se convirtió en la serie SMS, bautizada como GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) a partir de 1975. En el momento presente, se cuenta con tres satélites de esta familia, que cubren el conjunto del territorio norteamericano, así como el Atlántico norte. El satélite incluye un sensor de barrido, denominado VISSR, que registra el disco visible de la Tierra cada 30 minutos, ofreciendo imágenes en el espectro visible e infrarrojo térmico.

Similar configuración tiene el satélite europeo Meteosat. Lanzado por vez primera en 1977, hasta el momento se han puesto en órbita cinco más (1981, 1988, 1989, 1991 y 1993), contribuyendo de modo decisivo a la predicción meteorológica en Europa y África. Inicialmente todos ellos se situaban en longitud 0°, pero el Meteosat-3 se desplazó hacia el Oeste para facilitar el seguimiento de huracanes tropicales. Los satélites Meteosat están financiados por una organización intergubernamental denominada Eumetsat.

Estos satélites cuentan con un sensor de barrido, que ofrece información sobre tres bandas del espectro: 0,4 a 1,1 µm, 5,7 a 7,1 µm y 10,5 a 12,5 µm (fig. 3.4). La primera es bien conocida por su aparición en los medios de comunicación. La segunda, se emplea para estudiar el contenido de vapor de agua en la atmósfera, mientras la tercera (térmica) se dirige a la discriminación de tipos de nubes y temperaturas de superficie. La resolución espacial que ofrece es de 2,5 x 2,5 km en el visible y 5 x 5 km en el infrarrojo medio y térmico. La imagen completa del Meteosat cubre el disco visible de la Tierra, desde su posición a 0° de latitud y longitud (fig. 3.26*). Estos satélites proporcionan imágenes cada 30

minutos. La transmisión se realiza en tiempo real a la estación receptora de Darmstadt (Alemania), en donde se sitúan las oficinas centrales de Eumetsat. Tras algunas correcciones estos datos son enviados a una amplia red de estaciones receptoras, ya sea en alta resolución digital (a las estaciones primarias, *Primary Data User Stations*, PDUS), o en modo analógico.

Se encuentra en estudio el lanzamiento de una nueva generación de satélites Meteosat, que mejorará notablemente la información proporcionada por esta plataforma. Se estudia la mejora de la resolución temporal —de 30 a 15 minutos—, espacial —hasta 1 km en el visible y 3 en el resto—, y espectral, incorporando nuevas bandas en el visible, infrarrojo medio y térmico (hasta 12 canales). Esto aumentará notablemente el flujo de datos brutos que envía el satélite (de 0,33 Mb/sg a 3,2 Mb/sg), complicando tanto su envío (nuevos sistemas de comunicaciones), como su recepción. Por el contrario, permitirá mejorar notablemente el rango de aplicaciones de estas imágenes, no sólo en cuestiones meteorológicas, sino también en temas ambientales de diverso tipo.

Como es lógico, la aplicación básica de estos satélites meteorológicos es la observación de las condiciones atmosféricas, de cara a predecir el tiempo. Algunas variables que pueden obtenerse a partir de los datos suministrados por estas plataformas son la cobertura y tipo de nubes, el contenido de vapor de agua en la atmósfera, la precipitación acumulada, el viento superficial y en altura, el albedo superficial, la irradiancia solar, y la temperatura del agua del mar (Carleton, 1991). Resultan, además, de especial relevancia en la estimación de fenómenos catastróficos, como huracanes (fig. 3.27) o gotas frías. En conjunción con otras plataformas heliosíncronas (como NOAA o Nimbus), la meteorología desde satélites se destaca actualmente como la principal aplicación operativa de la teledetección espacial (Barret, 1974; Carleton, 1991).

3.5.5. Programas de observación con equipos radar

El notable interés que en los últimos años han despertado los radar de abertura sintética (SAR), explica que sea plenamente justificado dedicar un epígrafe íntegro a las misiones espaciales basadas en estos equipos, pues constituyen actualmente la línea de desarrollo más fructífera en teledetección espacial.

3.5.5.1. Seasat

El primer satélite equipado con SAR fue el Seasat, lanzado en 1978. Contaba con polarización semejante HH, un ángulo de incidencia entre 20 y 26 grados y 25 m de resolución espacial. Además, incorporaba un altímetro de bastante precisión. Sus principales aplicaciones eran oceanográficas, de ahí el nombre,

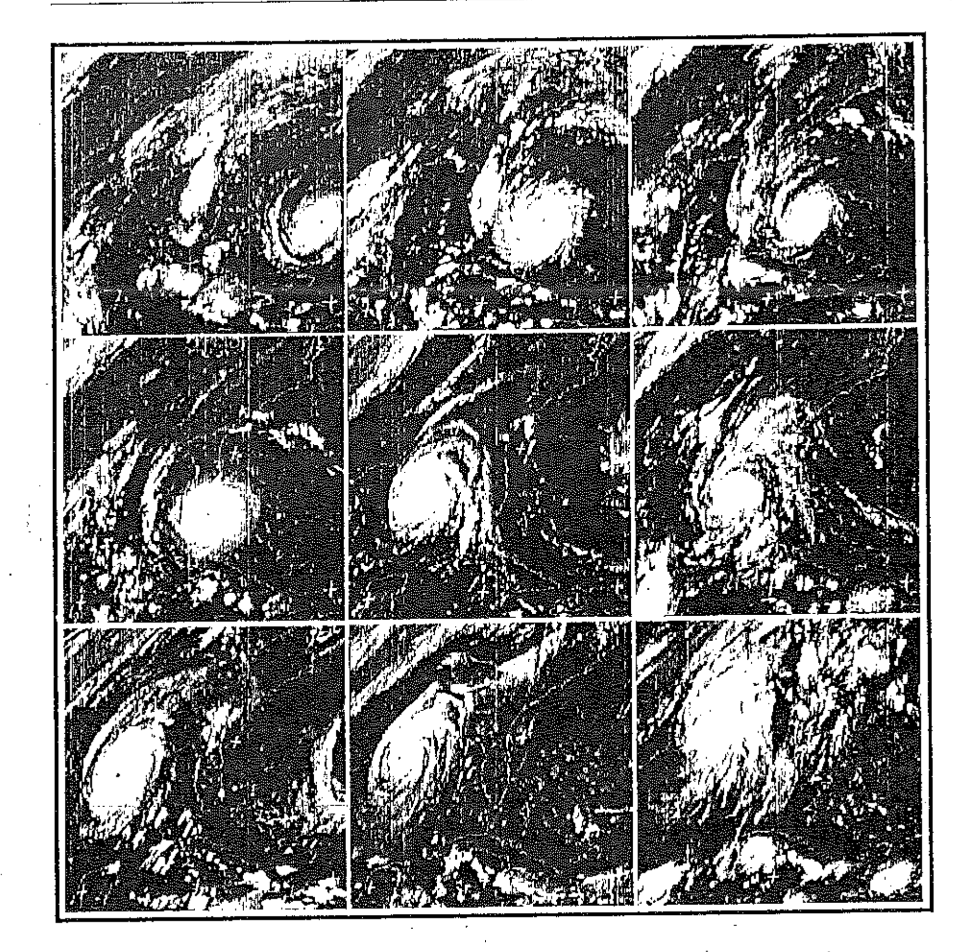


Fig. 3.27 - *Seguimiento de la evolución el huracán Andrew, que azotó las costas de Florida y el Caribe entre los días 23 y 26 de Agosto de 1992. Las imágenes corresponden al canal visible del Meteosat-3 (Cortesía, ESA).*

principalmente una medición más precisa del geoide marino. Junto a ello, permitió abordar estudios sobre altura del oleaje, detección de bancos de arena sumergidos, corrientes oceánicas, etc. (Elachi, 1982). Pese a la brevedad de su misión —dejó de funcionar a los 99 días de su lanzamiento—, el rango de aplicaciones que ha alimentado es muy amplio. Junto a las oceanográficas, destacan la localización de accidentes geológicos (Koopmans, 1983), cartografía de la cobertura del suelo (Deane, 1980), de la vegetación (Parry y Trevett, 1979), y del medio urbano (Henderson, 1983).

Un ejemplo de estas imágenes es la presentada en la figura 3.28, adquirida por este satélite en agosto de 1978. Corresponde a la parte meridional de la

0 5 10 Km. Trayectoria del Satélite N

Fig. 3.28 - *Imagen Seasat de Monforte de Lemos y cauce del Miño (cortesía R. Núñez de las Cuevas)*

meseta de Lugo, centrada en la ciudad de Monforte de Lemos, que aparece en el centro de la imagen con tonos blancos, a consecuencia del alto coeficiente de retro-dispersión de las áreas urbanas (2.7.1). El relieve local resulta muy realzado, especialmente en el cauce de los ríos Miño, Sil y Lor.

3.5.5.2. SIR

La fecunda misión del Seasat se vio ampliada sucesivamente por varios radar de imágenes instalados en el transbordador espacial norteamericano (*Space Shuttle*). En concreto, las misiones de este equipo se desarrollaron en los años 1981, 1984 y 1994, con el nombre de SIR-A, B y C, respectivamente. Las dos primeras misiones son similares al SAR del Seasat, trabajando en la banda L, con resolución de 25 a 40 m., y polarización HH, aunque ofrecían un mayor ángulo de observación: 47 grados en el SIR-A y 15 a 60 grados en el SIR-B, gracias, en éste último, a una antena direccionable. También en el SIR-B se introduce la grabación digital de los datos. El SIR-C supera los rasgos técnicos de sus predecesores, con tres bandas de observación (L, C y X), polarización semejante y cruzada, ángulo de observación variable (de 20 a 55 grados), resolución de 25 a 30 m y grabación digital. La acción de estos SAR ha permitido confirmar las posibilidades de este tipo de sensores para la cartografía temática (Llop et al., 1987). La figura 3.29 muestra un ejemplo de este tipo de información. Se trata de una imagen tridimensional de la isla Isabela, en el archipiélago de las Galápagos (Ecuador); construida a partir de una imagen del SIR-C (banda X, polarización vertical semejante) y un modelo digital del terreno. Se observan los volcanes de Alcedo y Sierra Negra, con los flujos de lava más recientes y rugosos en tonos claros y las cenizas y lavas finas en oscuros.

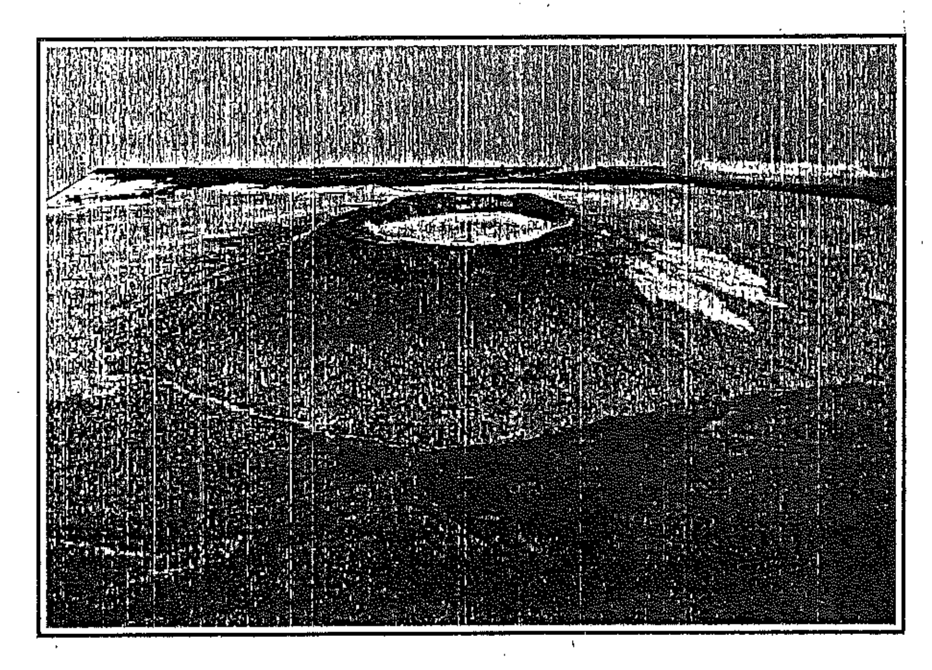


Fig. 3.29 - *Imagen adquirida por el radar del SIR-C sobre la isla Isabela en Abril de 1994 (cortesía del Jet Propulsion Laboratory, Pasadena)*

3.5.5.3. *Almaz*

En orden cronológico el siguiente satélite equipado con un radar de imágenes es el ruso Almaz, lanzado en marzo de 1991, aunque ya tenía un precedente en el Cosmos-1870, equipado, como el Almaz, con un SAR trabajando en la banda S y con una resolución en terreno de 20-25 m. Almaz se considera un satélite operativo, gestionado comúnmente por la agencia espacial rusa y una serie de empresas privadas de otros países. Incluye un SAR que trabaja en banda S, observando una zona de unos 40 km x 300 km, con una resolución de 10 a 15 m. El ángulo de incidencia puede variar entre 30 y 60 grados, y la codificación de los datos es digital. Está previsto continuar la serie con otro satélite, planeado para 1997, que incorporará un SAR con tres bandas (X, S y P), distintos ángulos de incidencia y de polarización. Además, en la misma plataforma se incorporarán otros sensores ópticos, como un explorador de empuje con recubrimiento estereoscópico (precisión espacial de 2 a 4 m), un equipo de barrido para exploración oceanográfica, con cobertura global, y otro con resolución intermedia (Kramer, 1994).

3.5.5.4. *ERS*

Dejando a un lado los meteorológicos, el primer satélite europeo de teledetección también se incluye entre los programas de observación con equipos radar. El *European Remote Sensing Satellite* (ERS-1) se lanzó en julio de 1991 desde Kourou, en la Guyana francesa. Originalmente diseñado para complementar la observación proporcionada por los equipos ópticos (instalados a bordo del Landsat o SPOT), el satélite ERS se dirige principalmente al estudio del océano y la criosfera, aunque también se han observado muy interesantes aplicaciones en seguimiento de procesos terrestres. El ERS orbita a una altitud de 780 km, mide 12 x 12 x 2,5 m y pesa 2.400 km (ESA, 1992).

Su carga útil se compone básicamente de dos sensores radar y un explorador de infrarrojo térmico. El equipo más importante, sin duda, es el instrumento activo de micro-ondas (AMI, *Active Microwave Instrument*), que incluye un radar de imágenes y un dispersómetro de vientos. El primero puede utilizarse en modo imagen, trabajando en banda C (5,3 Ghz), polarización vertical semejante, con una resolución espacial de 26 m en profundidad y entre 6 y 30 m en acimut, y un área cubierta de 102 km. El ángulo medio de incidencia es 23°. Como el flujo de datos es muy elevado, sólo se emplea cuando se encuentra en el área de alguna antena de recepción terrestre; además, sólo puede activarse 12 minutos por órbita. Este equipo también puede trabajar en modo "olas", directamente dirigido al estudio del oleaje marino. La resolución espacial es la misma, pero se disminuye drásticamente el área abarcada en cada adquisición (0,6 x 12 km). Por último, este equipo puede también funcionar como un dispersómetro, para medir la dirección

y velocidad del viento en el océano, para lo que utiliza tres antenas que emiten pulsos hacia distintos ángulos. El área total cubierta es de unos 500 km de ancho, con una resolución aproximada de 45 km.

El segundo equipo de micro-ondas es un altímetro, trabajando en banda K (13,8 Ghz), que permite observaciones verticales. Midiendo el tiempo que tarda en recogerse el pulso emitido, es capaz de calcular la altura del oleaje con una precisión de 10 cm. También puede utilizarse para medir el campo de vientos (complementando al AMI), y para estudiar la topografía de los campos de hielo.

Finalmente, el ERS-1 incorpora un equipo de barrido térmico, denominado ATSR (*Along Track Scanning Radiometer*), diseñado por un consorcio de empresas inglesas y australianas para proporcionar una medida precisa de la temperatura del agua del mar y del techo de las nubes. Cuenta con cuatro bandas en el infrarrojo medio y térmico. Ofrece una precisión de hasta 0,1 K, con una resolución espacial de 1 Km en franjas de 500 x 500 km. En el ERS-2, se ha incorporado una versión mejorada de este sensor, denominado ATSR-2, que incorpora tres nuevas bandas en el visible e infrarrojo próximo.

El segundo satélite ERS, lanzado en 1995, incorpora además un instrumento específico para medir el contenido de ozono en la atmósfera. Se denomina GOME (*Global Ozone Monitoring Experiment*), y proporciona medidas del contenido en la atmósfera de diversos gases (ozono, dióxido de nitrógeno, oxígeno, etc.), mediante una técnica de absorción espectróscopica diferencial.

La figura 3.30* incluye una composición multitemporal de imágenes ERS que muestran el impacto del naufragio del petrolero Mar Egeo sobre el puerto de la Coruña, en diciembre de 1992. La mancha de crudo, al ser más viscosa que el agua, disminuye notablemente la rugosidad, por lo que la señal de retorno es muy inferior al agua no afectada. La imagen multitemporal nos permite ver el estado de regeneración en las zonas dañadas. Estos datos se utilizan de modo operativo para detectar vertidos incontrolados de petróleo, que son práctica habitual en muchos buques para limpiar sus tanques.

3.5.5.5. *JERS-1*

El satélite japonés JERS-1 supone la aportación de este país a la teledetección con equipos SAR. Fue lanzado en 1992 y cuenta con un radar trabajando en banda L, con polarización HH, ángulo de observación de 35 grados y resolución espacial de 20 m. (cubriendo un área de 75 km de lado). Además de este sensor, el JERS-1 cuenta con un equipo óptico, denominado OPS (*Optical Sensor*), que proporciona información de 8 bandas en el visible, infrarrojo cercano y medio, con unos 25 m. de resolución espacial. La banda 8 proporciona la misma

información espectral de la 3 (0,76 a 0,86 μm), pero el ángulo de observación se inclina hacia la dirección de la órbita, lo que permite cobertura estereoscópica en ese rango espectral.

La figura 3.31. recoge una imagen SAR del JERS-1sobre la región centro-occidental española, comprendida entre la Sierra de Ayllón y el inicio del Sistema Ibérico. Se observan con claridad los embalses del Vado, el Atazar y Pálmaces, el cauce del Jarama y el Sorbe. Los núcleos de población aparecen con tonos más claros. Las vertientes de los pequeños arroyos, subsidiarios del Henares están muy marcadas.

3.5.5.6. Radarsat

El último satélite equipado con equipos de micro-ondas que ha sido lanzado al espacio es el canadiense RADARSAT, en noviembre de 1995. Se trata del primer proyecto de teledetección que desarrolla íntegramente Canadá, que cuenta, por otro lado, con una amplia experiencia en aplicaciones de esta técnica. Se trata de un radar bastante avanzado, que puede operar en distintos modos, con variadas resoluciones espaciales, áreas de cobertura y ángulos de incidencia[4]. Lo común a todos ellos es su frecuencia (banda C=5,3 Ghz), idéntica al ERS, y polarización horizontal semejante (HH). La resolución espacial puede variar entre 11 y 100 m, y el área cubierta entre 50 y 500 km. Para el modo estándar de operación, la frecuencia temporal es de 24 días. En cuanto al ángulo de incidencia, puede variar de modo operativo entre los 20 y 50°, alcanzando hasta 10 y 60°, en modo experimental.

3.5.6. Otros programas de observación terrestre

Además de los satélites Landsat y SPOT, entre los sensores de observación óptica resulta obligado hacer referencia al satélite japonés MOS, al indio IRS y al norteamericano DMSP, recientemente disponible para usos civiles.

El satélite MOS (*Marine Observation Satellite*), fue lanzado por vez primera en febrero de 1987, ampliándose la serie con una segunda plataforma en 1990. Se ha diseñado primariamente para la investigación oceánica, aunque también cuenta con interesantes rasgos para su aplicación terrestre. Su carga útil se compone de los siguientes sensores: un equipo de exploración por empuje, bautizado como

[4] La revista canadiense de Teledetección (*Canadian Journal of Remote Sensing*) dedicó un número monográfico en noviembre de 1993 (vol. 19, número 4) a explicar con detalle las características técnicas de este equipo, así como su rango potencial de aplicaciones.

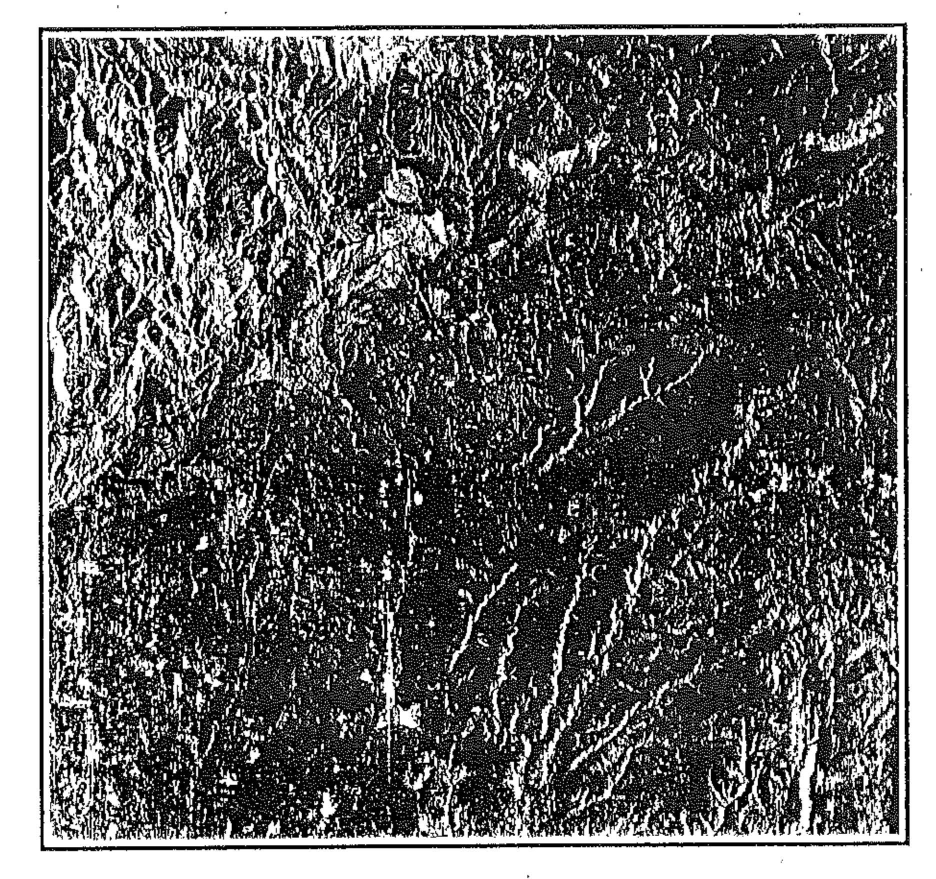


Fig. 3.31 - *Imagen del radar instalado en el JERS-1 sobre la región central española (Cortesía NASDA* - Earth Observation Center*)*

MESSR (*Multispectral Electronic Self-Scanning Radiometer*), con una resolución de 50 m y cuatro bandas espectrales, dos en el visible y dos en el infrarrojo cercano; un explorador de barrido, denominado VTIR (*Visible and Thermal Infrared Radiometer*), con una banda en el visible y tres en el infrarrojo térmico (resolución espacial de 900 y 2.700 m, respectivamente); y un radiómetro de micro-ondas, el MSR (*Microwave Scanning Radiometer*), operando a 23 y 31 GHz, con resolución de 32 y 23 km, respectivamente (Tsuchiya et al., 1987).

De estos sensores, el más destacado para estudios medio ambientales es el MESSR, similar al HRV-SPOT en cuanto a tecnología, al MSS en cuanto a resolución espectral, y a medio camino entre éste y el TM respecto a su resolución espacial. Este sensor ofrece imágenes de 100 x 90 km, con un ciclo de recubrimiento de 17 días. Si bien no contamos con experiencia directa en el tratamiento de estas imágenes, no cabe duda que pueden ser una valiosa alternativa para numerosos

estudios, tanto por la calidad del sensor, como por el coste de las imágenes, sensiblemente inferior a las del sensor TM o SPOT. La agencia espacial japonesa (NASDA), comercializa estas imágenes en nuestro territorio a través de la red europea EARTHNET, contando con estaciones receptoras en Maspalomas y Trömsø.

En cuanto al programa espacial indio, destacan los tres satélites IRS (*Indian Remote Sensing Satellite*), lanzados hasta el momento (1988, 1994 y 1995). El objetivo directo de esta misión es mejorar el conocimiento de los recursos naturales de ese gran país asiático. El IRS es sucesor de dos proyectos previos de la agencia espacial india: los Bhaskara I y II, dotados de sistemas de vídeo. En el caso del IRS se opta por la tecnología de exploración por barrido, con dos sensores denominados LISS (*Linear Imaging Self Scanning*) que ofrecen una resolución de 72,5 m (LISS-I) si opera una cámara, y 36,25 m (LISS-II) si operan dos. La superficie cubierta en cada escena es de 148 km para el LISS-I, y de 74 km para el LISS-II, con un ciclo de repetición de 22 días. El sensor LISS facilita información sobre cuatro bandas del espectro, comprendidas entre el azul y el infrarrojo próximo (tabla 3.4), por lo que resulta idóneo para estudios costeros, discriminación de cubiertas vegetales y exploración minera. Muy recientemente se han obtenido acuerdos de recepción con estaciones de EE.UU. y Europa (DLR-GAF) para adquirir imágenes LISS. El satélite más reciente (IRS-1C) incluye un canal pancromático (0,5-0,75 μm), con 5,8 m de resolución espacial, y un sensor de visión amplia (WIFS) con resolución de 180 m y 2 bandas (rojo e infrarrojo cercano).

Los satélites de la serie DMSP (*Defense Meteorological Satellite Program*) se diseñaron inicialmente con el propósito de facilitar información global y diaria sobre la cobertura de nubes, con fines militares. Dotados originalmente con sistemas de vídeo, a partir de los años 70 se mejoran con equipos de exploración y radiómetros pasivos de micro-ondas. Gracias a la continuidad de la serie (ya están construidos satélites de esta serie hasta el año 2005), y a su reciente disponibilidad para aplicaciones civiles, se trata de una información de gran interés para la observación global, completando la proporcionada por el AVHRR del NOAA. El DMSP cuenta con varios sensores de exploración meteorológica, dedicados a observar las condiciones de las capas medias y altas de la atmósfera.

Banda	Amplitud (μm)	Región Espectral
1	(0,45 - 0,52μm)	Azul
2	(0,52 - 0,59μm)	Verde
3	(0,62 - 0,68μm)	Rojo
4	(0,77 - 0,86μm)	Infrarrojo cercano

Tabla 3.4 - *Características del sensor LISS*

Para aplicaciones terrestres, los sensores más interesantes a bordo del DMSP son el SSM/I (*Special Sensor Microwave Imager*), radiómetro de microondas, que completa las medidas realizadas por el Nimbus en los años 70, y el OLS (*Operational Linescan System*), que es el sensor más importante de la misión. El OLS es un equipo de barrido que proporciona imágenes diurnas y nocturnas en dos bandas: visible (0,5 a 0,9 μm) e infrarrojo térmico (10,5 a 12,6 μm). La resolución espacial puede llegar a 0,56 Km, aunque habitualmente se graba sólo una versión degradada, a 2,7 Km. Una curiosa capacidad de este sensor es adquirir imágenes nocturnas en el visible, gracias a amplificar notablemente su sensibilidad radiométrica. Esto le permite detectar focos de luz, ya sean urbanos, pozos de petróleo o incendios (Elvidge et al., 1995), obteniendo imágenes muy espectaculares de los patrones urbanos a escala global y sirviendo de complemento a otros sistemas para la detección de incendios.

La figura 3.32 ofrece una visión global de los núcleos urbanos de Europa, tal y como se observan por este sensor. Resultan evidentes las grandes concentraciones de población: Países Bajos, corredor del Rhin, áreas de París, Londres, valle del Po... etc., así como los vacíos demográficos, especialmente claros en el centro de España, Francia, Irlanda y, sobre todo, la costa del Adriático, Albania y el norte de Grecia.

3.5.7. Programas futuros

Las crecientes necesidades de información ambiental y las magníficas expectativas creadas por los proyectos en marcha, harán que en las próximas décadas se incremente notablemente el flujo de datos procedentes de teledetección espacial. Además del mantenimiento de las series actuales de datos, con vistas al seguimiento de procesos globales, se están estudiando numerosos proyectos que enriquecerán las escalas, rangos espectrales y ámbitos de cobertura actualmente disponibles. Nuevas agencias, además, están interesadas en lanzar al espacio proyectos de teledetección, como es el caso de la brasileña y china, que desarrollan conjuntamente un satélite de resolución media, orientado a la observación de fenómenos dinámicos en la Amazonia.

En cuanto a escalas, una tendencia de desarrollo reciente persigue poner en órbita pequeños satélites de muy alta resolución, diseñados para proporcionar información muy detallada de pequeños sectores del planeta. Algunos de estos satélites se están desarrollando por consorcios privados, que han percibido el interés comercial de esta técnica. Las agencias de noticias y las compañías de seguros pueden ser destinatarias de su información. Entre los proyectos más avanzados están los liderados por las empresas *Earth Watch*, *Space Imaging* y *Orbimage*. En sus planes está situar en órbita sensores de resolución comprendida entre 1 y 2 metros en pancromático y de 4 a 8 metros en multiespectral (Jensen, 1996).

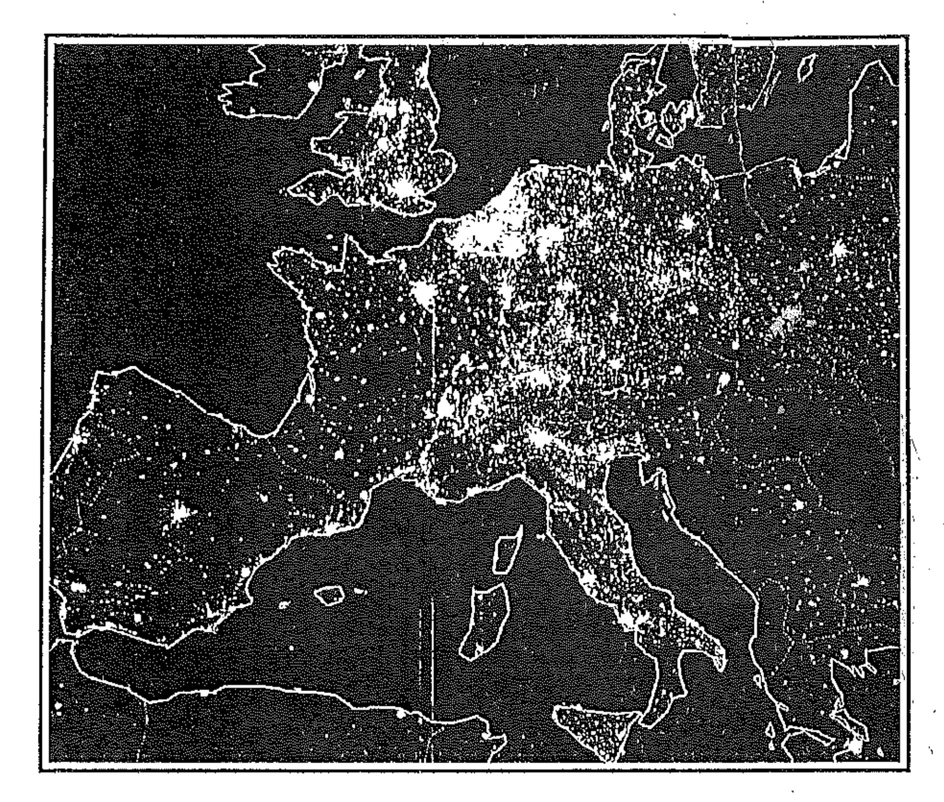
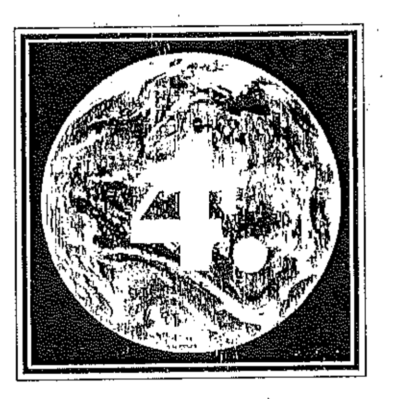


Fig. 3.32 - *Luces urbanas de Europa, tal y como se observan desde el satélite DMSP. La imagen corresponde al 6 de Enero de 1995 (Cortesía Christ Elvidge, NOAA- National Geophysical Data Center, Boulder, USA).*

La demanda de información multiespectral más precisa puede cubrirse con las imágenes proporcionadas por el sensor MODIS, a bordo de la estación polar norteamericana. Con 36 canales y resolución media (de 0,25 a 1 km), completará sin duda la obtenida actualmente por el AVHRR, mejorando las capacidades de éste para determinar contenido de humedad en la vegetación, detectar incendios, o analizar la cobertura de nieve. Con esta orientación ambiental-global se ha diseñado el futuro satélite europeo Envisat, que incluirá un radar de abertura sintética avanzado (ASAR), un altímetro mejorado, un radiómetro de micro-ondas, un radiómetro de resolución media (visible e infrarrojo, denominado MERIS), un interferómetro para sondeos atmosféricos (MIPAS), y un instrumento para medir concentraciones de ozono (GOMOS). También en los planes de la Agencia Espacial Europea (ESA) está la puesta en órbita de una nueva serie de satélites meteorológicos, denominada METOP, de órbita polar, para complementar las medidas de los geoestacionarios (Meteosat de segunda generación). La estrategia de la ESA en observación terrestre pasa por cooperar con otras agencias en la instalación de una estación orbital con diversos instrumentos de teledetección (Torres, 1994).

PARTE II:
LA INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS



BASES PARA LA INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES EN TELEDETECCIÓN ESPACIAL

«Las palabras se hacen fronteras cuando no nacen del corazón.»

[Gloria Estefan, *Mi Tierra*]

A partir de este capítulo, se desarrolla el núcleo central de este libro. Como ya señalábamos en la introducción, el objeto de esta obra es facilitar el acceso a una técnica que puede ser muy fructífera en la mejor comprensión de diversos fenómenos ambientales. Por tanto, se ha puesto más el énfasis en la interpretación que en la obtención de las imágenes. Los capítulos previos se dirigen precisamente a facilitar esa interpretación, de tal forma que cada uno pueda aplicar las imágenes espaciales a su propio ámbito de interés.

En este apartado se presentan algunas ideas introductorias, útiles en el momento de proyectar una aplicación temática a partir de los datos suministrados por sensores espaciales. Parece lógico que antes de abordar la interpretación propiamente dicha se consideren una serie de cuestiones, como son las referidas al tipo de sensor o de tratamiento más conveniente para la aplicación que se persigue.

La respuesta a estos interrogantes se relaciona con diversos factores, si bien, entre ellos, cabe destacar dos fundamentales: (i) los objetivos del proyecto, y (ii) los medios disponibles para su realización. Lógicamente, los objetivos del trabajo orientan la mayor parte de las decisiones consiguientes, como son las relativas al tipo de información necesaria, a su precisión, escala y nivel de desagregación. Por su parte, los medios disponibles implican un equilibrio entre lo deseable y lo posible, restringiendo el método más idóneo para abordar los objetivos marcados, ya sea en lo que se refiere a las imágenes disponibles para el análisis, ya a los medios para su interpretación (fig. 4.1).

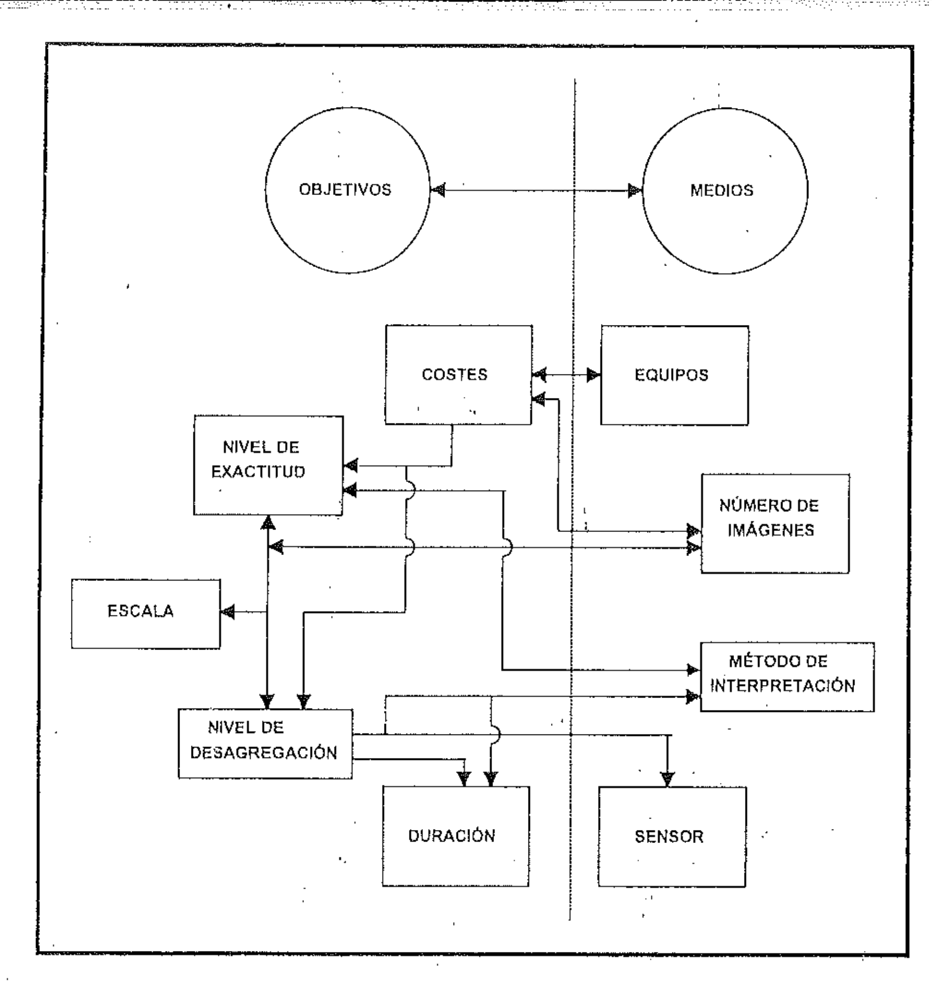


Fig. 4.1 - *La interpretación de imágenes en teledetección implica tomar una serie de decisiones que optimicen alcanzar los objetivos perseguidos en función de los medios disponibles*

4.1. Información que puede derivarse de una imagen: tipos de interpretación

Cualquier usuario novicio de la teledetección debería tener presente que es una técnica con limitaciones, válida para resolver un determinado número de problemas. No es, como se ha concebido en algunos ambientes, una panacea que solucione todas las necesidades de información sobre el medio ambiente que se requieren actualmente. Falsas expectativas pueden conducir a falsas conclusiones, arribando al polo opuesto; esto es, a concebir la teledetección espacial como una técnica más vistosa que eficaz. Para evitar uno y otro extremo, cualquier proyecto de aplicación debería comenzar cuestionándose si esta técnica puede solventar el objetivo marcado, y si la información que ésta ofrece no es obtenible por otros medios más rápidos o económicos.

La respuesta no siempre es sencilla. El rango de aplicaciones de la teledetección está en constante crecimiento, gracias a las innovaciones en los equipos sensores y en los métodos de tratamiento. Sin embargo, parece lógico que un trabajo de aplicación se base sobre un soporte previo, en donde diversos proyectos de investigación hayan demostrado la validez de una determinada metodología. A este respecto, existe ya un buen grupo de estudios en donde la teledetección espacial está reconocida como una fuente primaria de información, como son la cartografía de la cobertura del suelo, estadística agraria, exploración minera, temperatura y componentes del agua, determinación de recursos pesqueros, evaluación de ciertos impactos ambientales y predicción meteorológica. Otra serie de aplicaciones se encuentran aún en fase de experimentación, como es el caso de la estimación de biomasa en cultivos, inventario del volumen de nieve, detección de contaminantes o cálculos demográficos. Por último, otros proyectos parecen aún inviables a partir de esta técnica, ya sea por el nivel de precisión que exigen (inventario ganadero o de animales silvestres), ya por falta de la resolución espacial, temporal o espectral necesaria (levantamientos catastrales, detección de aerosoles y partículas contaminantes). En cualquier caso, una inspección a la amplia bibliografía disponible evitará concebir esperanzas irreales y realizar gastos innecesarios.

El término tipos de interpretación que utilizamos en este epígrafe hace referencia a las posibles formas de abordar el análisis de las imágenes. A nuestro juicio, a partir de una imagen de satélite se pueden generar cuatro tipos de productos (fig. 4.2):

(i) cartografía temática, mediante la clasificación, visual o digital, de las imágenes en una serie de categorías homogéneas. En pocas palabras, este enfoque pretende discriminar cubiertas, etiquetar cada píxel en la clase temática más apropiada. Ésta ha sido la aplicación más común del análisis de imágenes, ya desde los primeros años de vida del sensor Landsat-MSS, las aplicaciones desarrolladas pretendían obtener un inventario y cartografía de un determinado fenómeno: cobertura del suelo, litologías, tipos de nieve, etc. Suponiendo que la asignación de píxeles a categorías sea correcta, este enfoque presupone que cada píxel es homogéneo —ya que se etiqueta con un sólo valor— y, por tanto, que existen transiciones bruscas en el espacio. Supongamos que un píxel se cataloga como forestal y el vecino como matorral; lo habitual será que en el terreno ambos cuenten con las dos cubiertas, en mayor o menor proporción, pues los cambios de vegetación son graduales. Aunque los métodos más recientes de clasificación permiten asignaciones múltiples (ver 7.1.6 y 7.2.3.4.4), cualquier intento de agrupación implica una partición más o menos rígida del espacio.

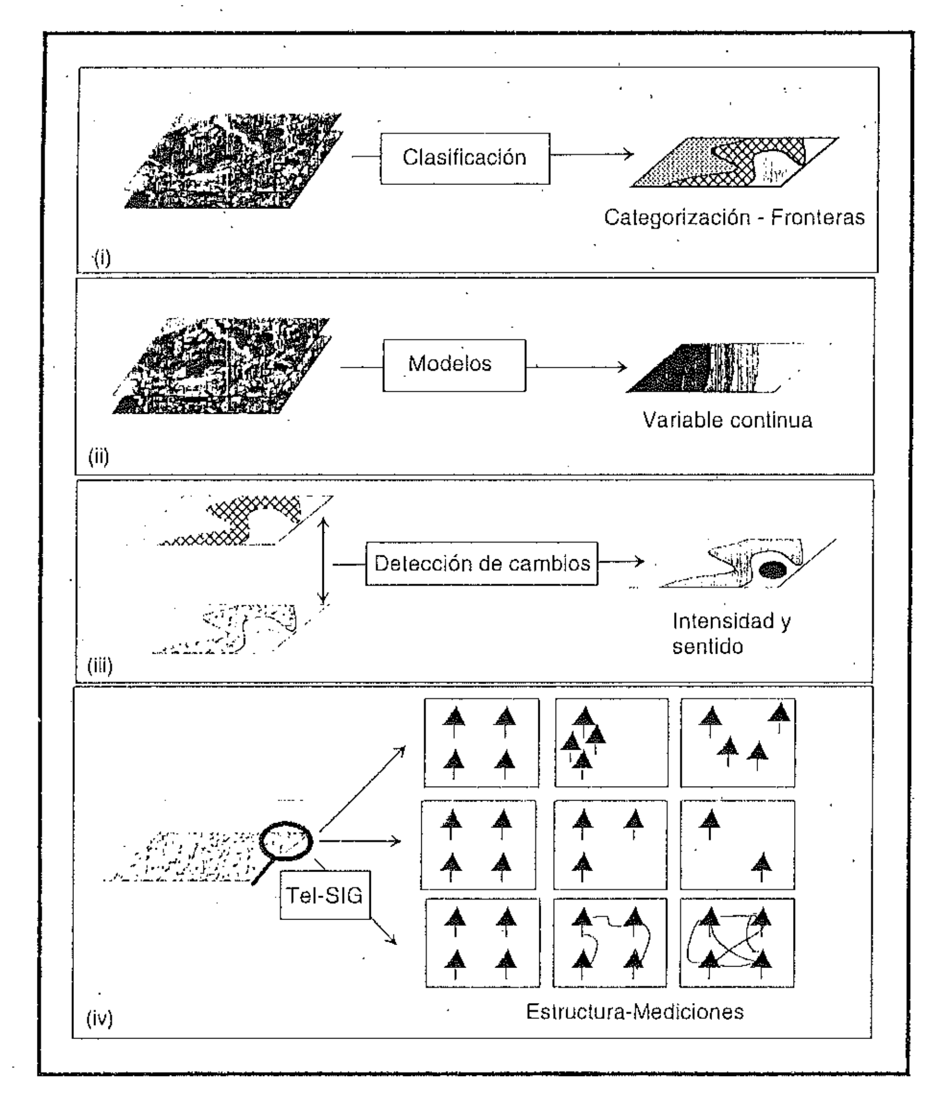


Fig. 4.2 - *Tipos de análisis que pueden abordarse en una imagen de satélite (ver texto para detalles)*

(ii) Un segundo enfoque considera a las imágenes de satélite como una matriz de medidas sobre el terreno. En pocas palabras, la exploración que realizan los equipos sensores se concibe como un procedimiento para muestrear —a intervalos regulares, marcados por la resolución espacial del sensor— una determinada variable de interés ambiental. De esta forma, puede obtenerse una visión muy detallada de la distribución espacial de esa variable, que no sería abordable con métodos de muestreo convencionales. El caso más evidente es el estudio de la temperatura de la superficie marina. Previamente a la actividad de los satélites oceanográficos, sólo se realizaban mediciones en puntos muy distantes (boyas), interpolándose esos valores al resto de la superficie marina. Con la observación espacial pueden obtenerse mediciones de la temperatura, la salinidad o la clorofila del agua a intervalos regulares y relativamente cercanos, en un rango de cientos de metros a pocos kilómetros, ofreciendo una imagen mucho más certera de la realidad. En este enfoque de interpretación, la teledetección se orienta a generar variables biofísicas, mediante algún modelo que relacione las medidas del sensor (reflectividad, emitancia) con dichas variables (ver cap. 7.1).

(iii) Determinación de cambios. Una de las principales ventajas de la teledetección espacial es su capacidad para seguir fenómenos dinámicos, gracias a la cobertura cíclica que proporcionan. Esta capacidad resulta de gran interés para inventariar ciertos procesos ambientales: crecimiento urbano, desecación de humedales, efectos de incendios o plagas, etc. Bajo esta óptica, el fin del análisis no es tanto establecer fronteras entre categorías, como señalar aquellas zonas de la imagen que han modificado sensiblemente sus rasgos espectrales entre dos o más fechas. Esa detección de cambios podía hacerse sobre imágenes previamente clasificadas o, de modo más habitual, sobre transformaciones de las bandas originales. En este segundo caso, el cambio puede medirse en una escala continua, ya que las imágenes de partida son cuantitativas y por tanto las técnicas aplicadas pueden también serlo (diferencias o cocientes entre fechas, regresión, componentes principales: cap. 7.3).

(iv) Finalmente, las imágenes de satélite también pueden considerarse como un mosaico donde se midan las relaciones espaciales entre los objetos. Bajo este punto de vista, lo que se pretende es generar información sobre la estructura espacial de la información detectada: variedad espacial entre manchas del territorio (textura, diversidad), forma (compacidad), vínculos entre elementos (conectividad), etc., aprovechando el carácter digital de la imagen (ver cap. 7.4).

4.2. Fases en la interpretación

4.2.1. Definición de la escala y leyenda de trabajo

Supuesto que el objetivo de nuestro trabajo sea abordable a partir de sensores espaciales, deben definirse una serie de aspectos para explicitar el tipo de información y de tratamiento que se aplicará en el estudio.

Con este propósito, conviene considerar principalmente la escala y nivel de desagregación requerida para el trabajo. Ambos aspectos están íntimamente relacionados. La escala del trabajo condiciona la unidad más pequeña de informa-

ción que se debe incluir en el mapa, que suele denominarse mínima unidad cartografiable (MUC). Varios autores recomiendan que la MUC no sea inferior a 4 mm², medidos a escala del mapa (Anderson et al., 1976; Campbell, 1987). De ahí que la escala de trabajo esté directamente relacionada con el tipo de sensor más idóneo para abordar el mismo. No tendría sentido realizar una cartografía a escala 1:50.000 utilizando el sensor AVHRR del NOAA, pues la MUC sería de, aproximadamente, 2 x 2 cm (1 km² a esa escala). De igual forma, no sería muy razonable abordar un estudio de pequeña escala (p.ej, 1:1.000.000) a partir del sensor Landsat-TM, pues habrían de generalizarse notablemente los resultados para llegar a la MUC. De acuerdo con la Asociación Cartográfica Internacional, las escalas límite más idóneas para distintos sensores son (López-Vizoso, 1989):

NOAA - AVHRR .	1:2.000.000
Landsat - MSS.	1:200.000
Landsat - TM .	1:100.000
Spot - HRV (Pan).	1:50.000

Además de a la MUC, la escala también condiciona el número y desagregación de las categorías a discriminar. Obviamente, una cartografía a escala 1:50.000 no puede incluir el mismo número de clases que otra a escala menor: la necesaria generalización de líneas en mapas de pequeña escala exige también una generalización de las categorías cartografiadas.

Por otra parte, la leyenda no sólo está en función de la escala, sino también de la complejidad del territorio. Como consecuencia, ha sido práctica habitual en la cartografía de ocupación del suelo emplear una leyenda particular para cada zona de estudio, bien adaptada a las necesidades locales, pero con escasa validez para otros ámbitos. Por ejemplo, sobre una muestra de 28 trabajos extraídos de las referencias citadas al final de esta obra, ninguno presenta criterios comunes para el establecimiento de la leyenda de cobertura del suelo. Las clases más repetidas son agua —la más fácil de discriminar a partir de sensores espaciales—, área urbanizada, cultivada y forestal, aunque en estas últimas se realizan múltiples divisiones, según los objetivos específicos del inventario (Chuvieco, 1985a). Esta falta de criterios comunes dificulta la generalización de resultados a otros espacios, e invalida cualquier intento de cartografía sistemática del territorio.

Para subsanar estos problemas, el *U.S. Geological Survey* diseñó, a lo largo de los años setenta, diversos esquemas de clasificación para su cartografía de ocupación/uso del suelo (Anderson, 1971; Kleckner, 1982). El esquema más conocido se desarrolló en 1976, y está específicamente diseñado para el empleo de sensores remotos (Anderson et al., 1976). Se trata de una leyenda de uso y ocupación del suelo organizada en cuatro niveles jerárquicos, cada uno de los cuales se pretende obtener a partir de diversos medios de teledetección: imágenes de satélite para el nivel más general, y fotografía aérea de gran escala, en combinación con el trabajo de campo, para las clases más detalladas. Así mismo, esta clasificación es flexible, se puede aplicar a espacios muy contrastados, y garantiza la integración entre campos afines de inventario medio ambiental. El principal problema que presenta, a nuestro juicio, es la inclusión en el mismo esquema de clases de uso y de ocupación del suelo[1], lo que origina ambigüedad en el proceso de clasificación. Por ejemplo, un mismo objeto o grupo de ellos podrían asignarse a varias categorías de acuerdo a su consideración como uso u ocupación: canteras (uso) y roquedo desnudo (ocupación), o dehesa (uso) y pastizal arbolado (ocupación). Como es lógico, los sistemas de teledetección sólo permiten realizar cartografía de la ocupación del suelo, ya que la señal detectada por el sensor corresponde a los objetos que aparecen en la superficie terrestre, y no necesariamente al uso al que se destinan. El uso podría ser deducido por el intérprete en algunos casos (por ejemplo, a partir de una cubierta de cultivos, se infiere fácilmente un uso agrícola), pero no en otros (a partir de una cubierta de matorral no puede deducirse si el uso es ganadero o cinegético).

Pese a este problema, el trabajo de Anderson y colaboradores ha sido enormemente fructífero, y base para de otros intentos similares. Este es el caso de la leyenda diseñada para el programa *CORINE-Land Cover* (tabla 4.1), diseñada específicamente para trabajar con imágenes de satélite. Este proyecto, auspiciado por la Comisión Europea, forma parte de las bases de datos que se están generando para la Agencia Europea de Medioambiente. Pretende inventariar la ocupación del suelo de los países miembros a escala 1:100.000 a partir de interpretación visual (auxiliada con análisis digital) de imágenes de satélite. El proyecto puede calificarse como una de las primeras aplicaciones operativas de la teledetección espacial (descontando, naturalmente, las meteorológicas), ya que está concebido para generar un inventario sistemático de la cobertura del suelo de un amplio territorio (López-Vizoso, 1989; Comunidad Europea, 1993; Moreira y Fernández, 1995). Recientemente, se han añadido a este proyecto los países del Este europeo, siguiendo una metodología similar a la generada para los miembros de la Unión Europea.

La decisión sobre la leyenda de trabajo condiciona otros aspectos de la interpretación, como es el tipo de tratamiento o el número y fecha más conveniente de las imágenes a interpretar. Si se incluyen subdivisiones en categorías urbanas, el tratamiento digital resulta poco certero, siendo más apropiada la interpretación visual. De igual forma, bastaría una imagen estival para discriminar los cultivos de regadío, pero si se pretende distinguir entre ellos puede ser necesario adquirir imágenes adicionales, en donde éstos puedan diferenciarse más nítidamente. En

[1] Siguiendo la terminología anglosajona, distinguimos entre uso y ocupación del suelo (*land use* y *land cover*, respectivamente), según nos refiramos a la actividad humana sobre el territorio o a las cubiertas que aparecen sobre él (Chuvieco, 1985a).

Tabla 4.1 - **Clasificación propuesta para el proyecto de Ocupación del suelo de España** (*CORINE-Land Cover*)*

1. Superficies Edificadas e Infraestructuras:
   1.1. Zonas urbanas
   1.2. Zonas industriales, comerciales y de transporte.
   1.3. Zonas de extracción minera, vertederos y de construcción
   1.4. Zonas verdes y espacios de recreo.
2. Zonas agrícolas:
   2.1. Tierras de labor anual.
   2.2. Cultivos permanentes
   2.3. Praderas
   2.4. Zonas agrícolas heterogéneas
3. Zonas forestales, con vegetación natural y espacios abiertos:
   3.1. Bosques
   3.2. Espacios de vegetación arbustiva y/o herbácea
   3.3. Espacios abiertos con poca o nula vegetación
4. Zonas húmedas:
   4.1. Humedales continentales
   4.2. Humedales marítimos
5. Superficies de agua:
   5.1. Aguas continentales
   5.2. Aguas marinas

(*) Sólo se recogen los dos primeros niveles de la clasificación. En la adaptación española de la leyenda comunitaria se llega, en algunas cubiertas, hasta los cinco niveles.

cualquier caso, el nivel de detalle que ofrece la leyenda se relaciona estrechamente con el riesgo de error, por cuanto es altamente probable que cualquier subdivisión implique separar categorías muy similares espectralmente. Caso de que esa ulterior división no sea abordable a partir de las imágenes o del método de interpretación propuesto, deberá el usuario ajustar alguno de los dos parámetros: bien hacia una leyenda más generalista, bien hacia imágenes o métodos de tratamiento más refinados.

Con estas ideas en la mente, y considerando siempre el presupuesto y los medios disponibles, técnicos y humanos, se iniciará la planificación del proyecto. A este respecto, se abordan a continuación algunos aspectos a tener en cuenta

para una adecuada selección de la metodología y del tipo de información más conveniente a los objetivos fijados.

4.2.2. Selección del material de trabajo

Una vez establecida leyenda y escala de trabajo, puede abordarse la elección del material que constituirá la base del estudio. A este respecto, conviene considerar varios elementos: tipo de sensor, fecha de adquisición, soporte de las imágenes y material auxiliar.

4.2.2.1. Tipo de sensor

Como ya se ha indicado, el tipo de sensor más conveniente depende de los objetivos y el nivel de precisión requerido en el proyecto. Lógicamente, los inventarios globales habrán de partir de sensores de baja resolución espacial (tipo NOAA-AVHRR o Meteosat), mientras los de mayor escala se basarán en sensores que ofrecen una resolución espacial más detallada (Landsat-TM o SPOT-HRV).

No obstante, en otros casos la resolución espacial resulta secundaria frente a la temporal o espectral. Por ejemplo, si el fenómeno estudiado es muy dinámico en el tiempo, como sería el caso de la detección de incendios forestales o la predicción de cosechas, convendrá acudir a sensores de alta resolución temporal (como el AVHRR), aun sacrificando precisión espacial. En otras ocasiones, la dimensión espectral será dominante, por lo que convendrá acudir a sensores que ofrezcan información en determinadas bandas del espectro, donde se manifieste con mayor claridad el fenómeno de interés. Un buen ejemplo de esta idea serían los estudios de evapo-transpiración de masas vegetales a partir de sensores térmicos (Pierce y Congalton, 1988; Vidal et al., 1994). En definitiva, la resolución espacial es un elemento muy destacado para seleccionar el sensor más conveniente en cada caso, pero no debe ser el único a considerar (ver 3.2).

4.2.2.2. Fecha de adquisición

La fecha más conveniente para seleccionar la imagen está en estrecha relación con el tipo de fenómeno en estudio. Lógicamente, el momento más idóneo de adquisición será aquel en que mejor se discrimine dicho fenómeno, frente a otros de similar comportamiento espectral. Un trabajo de exploración minera probablemente requiera una fecha invernal, al ser mayor el efecto de sombras y, por tanto, la detección de lineamientos. Por el contrario, un inventario de regadíos sólo puede realizarse en los meses estivales, julio y agosto, cuando es más claro el contraste con los cultivos de secano. En ocasiones resulta necesario acudir a va-

rias fechas para abordar el estudio: por ejemplo, para seguir el ritmo de crecimiento de un determinado cultivo, o para estudiar los cambios entre dos momentos críticos. En estas situaciones, conviene construir un calendario fenológico de esa cubierta —y de las que ofrezcan un parecido comportamiento espectral—, con objeto de seleccionar las fechas en donde su comportamiento sea más específico del resto.

Cuando en estos trabajos de cartografía de la cubierta vegetal se disponga de un presupuesto escaso, puede ser preciso seleccionar una sola fecha, que maximice la separación entre todas las cubiertas. En ese caso, la elección más conveniente será una imagen adquirida en el verano, pues en ese momento es máxima la radiancia media percibida por el sensor, como consecuencia del mayor ángulo de elevación solar. Además, en el caso de nuestro clima mediterráneo, la estación estival coincide con la época de menor nubosidad y precipitación, lo que facilita la selección de imágenes de este período.

4.2.2.3. Soporte de las imágenes

El soporte sobre el que puede realizarse la interpretación depende del tipo de tratamiento que se aplique. En caso de que se opte por el análisis visual, se requiere resolver tres aspectos: (i) soporte material de la imagen, (ii) escala, y (iii) número de bandas y combinación de bandas seleccionada (fig. 4.3).

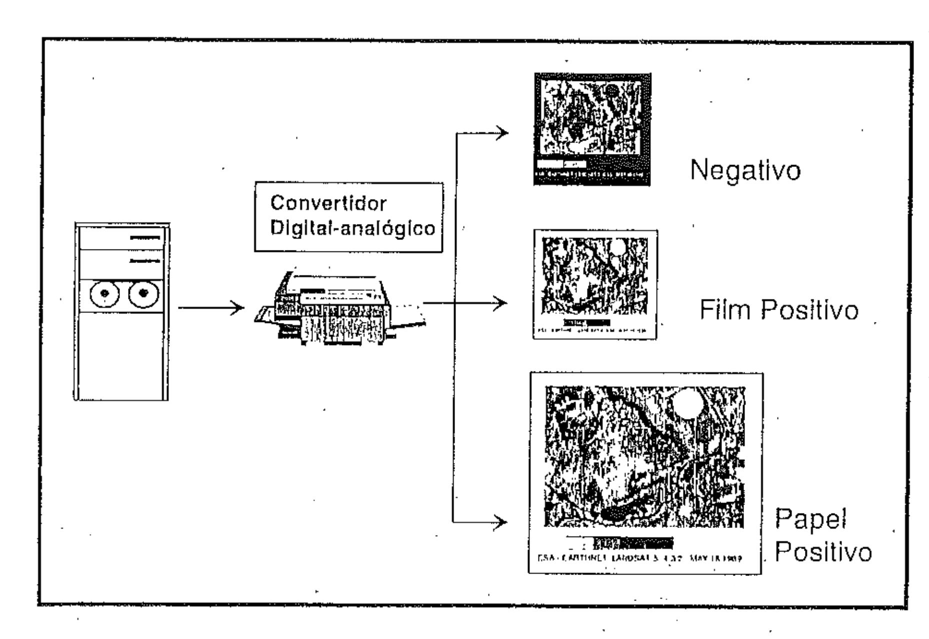


Fig. 4.3 - *Soportes más habituales de los productos fotográficos*

En lo que se refiere al primer aspecto, las entidades distribuidoras de imágenes ofrecen actualmente tres opciones. Las imágenes pueden pedirse en película negativo, en película positivo o en papel. La elección entre ellas dependerá del tipo de análisis que se pretenda abordar. Los negativos permiten tantas ampliaciones como sea preciso y a la escala deseada, pero la calidad de la copia en papel es inferior a la adquirida directamente en este soporte. El film positivo es muy útil para reproducción fotográfica e impresión de la imagen, especialmente cuando se trata de composiciones coloreadas de 3 bandas. Por último, el papel garantiza una interpretación directa de alta calidad, pero resulta rígida la escala y no admite copias sucesivas. Cuando se trata de composiciones en color, a partir de los negativos de cada banda pueden obtenerse tantas combinaciones como requiere el intérprete, mientras el film positivo o papel debe solicitarse ya con una determinada combinación de bandas.

En cuanto a la escala, los negativos de imágenes Landsat-TM (23 x 23 cm) se ofrecen a escala aproximada 1:1.000.000, si son imágenes completas, y 1:500,000 si son cuartos de escena, mientras los correspondientes al sensor Landsat-MSS se presentan a escala 1:1.000.000 (aquí no hay opción de solicitar cuartos). Ampliaciones en papel pueden adquirirse a 1:250.000 y 1:100.000, aumentando el coste con el tamaño del documento. Para sensores de menor resolución, tipo AVHRR o Meteosat, la escala es sensiblemente menor, y además no se producen rutinariamente productos fotográficos. Lógicamente la elección entre una y otra escala, como ya se vio más arriba, depende del objetivo final del trabajo.

El número de bandas más conveniente para un determinado proyecto depende directamente del fenómeno que se intente estudiar. Si la imagen se requiere para un estudio global, de diversos tipos de cubierta, puede ser una buena opción adquirir los negativos correspondientes a todas las bandas del sensor. A partir de ellos, pueden realizarse tantas combinaciones de color como se estime oportuno, acudiendo a los procesos habituales en las artes gráficas. Si el presupuesto es más limitado, bastará con un film positivo o papel que acoja una combinación coloreada de las tres bandas más convenientes para los propósitos del usuario. Esta opción ofrece, además, una mayor calidad para la reproducción, por cuanto evita procesos fotográficos intermedios.

Cuando se opte por el tratamiento digital de las imágenes, todavía resulta un soporte bastante habitual la cinta magnética compatible con ordenador (CCT), aunque cada vez son más empleadas las cintas de cartucho (predominantemente las Exabyte) y, sobre todo, el CD-ROM. Este último soporte es el más compacto, fiable y económico, ya que los lectores son de consumo masivo. Para imágenes Landsat-TM, se ofrece la posibilidad de solicitar la escena completa (185 x 170 km), sólo un cuarto de escena (100 x 100 km), o miniescenas (45 x 45 km). Dependiendo del área de interés, estos sub-productos pueden resultar mucho más rentables al intérprete. También pueden solicitarse áreas estándar, definidas por la

distribución de órbitas y escenas del satélite, o "ventanas móviles". En esta opción puede adquirirse una imagen indicando las coordenadas del centro de la escena, correspondiendo al organismo distribuidor generar los mosaicos entre órbitas, si fuera necesario (fig. 4.4).

4.2.3. Selección del método de análisis: ¿tratamiento visual o digital?

En los últimos años se ha desarrollado una cierta polémica sobre el método de análisis más idóneo para abordar un estudio de teledetección espacial. Como ya se comentó más arriba, las imágenes son adquiridas en formato numérico, gracias a una conversión analógico-digital realizada a bordo del satélite. Por tanto, el tratamiento digital resulta la opción de análisis más inmediata. Ahora bien, esos valores digitales también pueden convertirse a intensidades de luz (tonos), con lo que pueden generarse productos cuasi-fotográficos, susceptibles de interpretación visual.

En consecuencia, las imágenes pueden interpretarse digital o visualmente. Cabe preguntarse cuál de los dos resulta más idóneo para explotar adecuadamente el flujo de datos que la teledetección espacial ofrece. La respuesta no resulta sencilla. Simplificando un poco las cosas, pueden señalarse varios aspectos que conviene tener en cuenta antes de tomar una decisión en uno u otro sentido (fig. 4.5): (i) medios económicos y humanos disponibles, (ii) rapidez y precisión exigida, (iii) tipo y continuidad de las tareas, (iv) homogeneidad de la superficie analizada.

La disponibilidad de medios marca el primer criterio de decisión. En muchas ocasiones se asume que cualquier trabajo en teledetección espacial exige una considerable inversión de partida, por lo que se obvia una técnica que podría ser muy útil aun en situaciones de modesto presupuesto. En definitiva, apenas se considera que el análisis visual no requiere inversiones económicas importantes y puede garantizar un nivel de precisión suficiente para una determinada aplica-

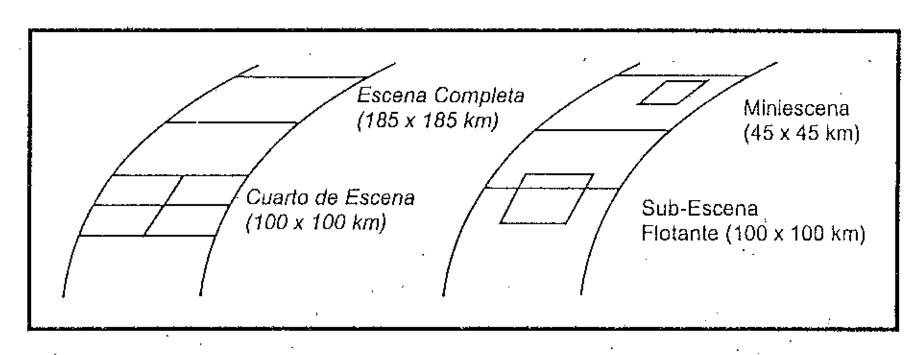


Fig. 4.4 - *Productos digitales disponibles para imágenes Landsat-TM*



TRATAMIENTO VISUAL	TRATAMIENTO DIGITAL
INVERSIÓN INICIAL ESCASA	INVERSIÓN ELEVADA
COSTES LINEALES	COSTES SE REDUCEN CON LA SUPERFICIE
REQUIERE CONVERSIÓN DIGITAL ANALÓGICA	PERMITE TRABAJO CON INFORMACIÓN ORIGINAL
NO PRECISA ALTA ESPECIALIZACIÓN	PRECISA ALTA ESPECIALIZACIÓN
BUENA PRECISIÓN EN CLASES HETEROGENÉAS	BAJA PRECISIÓN EN CLASES HETEROGÉNEAS
RESTITUCIÓN COMPLEJA	CORRECCIÓN GEOMÉTRICA SENCILLA Y RÁPIDA
INVENTARIO TEDIOSO E INEXACTO	INVENTARIO INMEDIATO
REQUIERE DIGITIZACIÓN PARA CONECTARSE A UN SIG	CONEXIÓN DIRECTA (FORMATO RASTER) O VECTORIZACIÓN (FORMATO VECTORIAL)

Fig. 4.5 - *Ventajas e inconvenientes del análisis visual frente al digital en la interpretación de imágenes*

ción. Por ejemplo, el coste por unidad de superficie de una imagen en falso color es considerablemente inferior al de la fotografía aérea, y puede ofrecer una exactitud adecuada (superior al 80 %) para un proyecto de media escala (1:200.000). Si se pretende realizar una cartografía de la vegetación a esta escala, la imagen de satélite puede salvar costes y reducir notablemente el tiempo de tratamiento frente a la fotografía aérea, que ofrece un detalle tal vez excesivo para la escala final del mapa. Además, conviene considerar que varios organismos han publicado estos últimos años coberturas de imágenes de distintas zonas del país (Martínez, 1996). Por ejemplo, el Instituto Geográfico Nacional distribuye orto-imágenes en papel

de toda España a diversas escalas, y a una fracción del coste que tienen originalmente. Si la fecha de la adquisición es adecuada para nuestro trabajo, ése será un punto de partida lógico.

En situaciones de presupuesto más desahogado puede abordarse el tratamiento digital de imágenes. El apoyo del ordenador, en principio, garantiza un tratamiento más rápido, económico y certero, pero requiere una mayor inversión inicial, pese a que los equipos y programas informáticos que permiten el tratamiento de las imágenes han reducido en los últimos años sensiblemente sus costes.

Esta inversión inicial hace referencia también al entrenamiento previo del intérprete. El análisis visual emplea claves de identificación similares a la foto-interpretación clásica (tono, textura, tamaño, localización, forma, etc.), por lo que no requiere un entrenamiento previo muy especializado, si bien, como es lógico, precisa una notable agudeza visual y mental, así como la debida experiencia, para obtener resultados brillantes. El tratamiento digital, por su parte, requiere una buena base estadística, conocimiento de sistemas informáticos y lenguajes de programación. Estos componentes no suelen formar parte de los curricula vigentes en las ciencias de la Tierra, por lo que puede resultar complejo el acceso al tratamiento digital para personas provenientes de esos campos de aplicación, aunque conviene considerar que esa base estadística e informática es sólo un medio para mejorar la interpretación, y no un fin en si mismo.

En pocas palabras, el tratamiento digital requiere mayor inversión económica y entrenamiento que el análisis visual. Como contrapartida, proporciona mayor versatilidad, rapidez y exactitud. No obstante, tales ventajas no son absolutas, sino muy dependientes de la configuración del equipo disponible, del entrenamiento del intérprete y de la complejidad del área de estudio. Por ejemplo, la velocidad de proceso está en función del equipo disponible, por lo que no puede afirmarse que todo tratamiento digital sea más rápido que el visual. El tratamiento digital basado exclusivamente sobre un ordenador personal, sobre imágenes de alta resolución y aplicado a zonas muy amplias, puede resultar bastante lento, por el importante volumen de datos a procesar. La misma zona puede ser interpretada visualmente en menos tiempo, siempre que la escala sea pequeña y no se requiera una leyenda excesiva pormenorizada.

En cuanto a la exactitud, también ha de matizarse la superioridad del tratamiento digital. Varios autores han comprobado la complejidad de clasificar digitalmente cubiertas que ofrecen una gran heterogeneidad espacial. El caso de las áreas urbanas es el más claro a este respecto (Toll, 1984; Atkinson et al., 1985). Se trata de zonas en donde se mezclan tejados, aceras, asfalto, jardines y espacios abiertos o deportivos. Esta complejidad puede identificarse visualmente gracias a criterios muy difícilmente traducibles a la clasificación digital: localización, textura, tamaño, formas, etc., por lo que la interpretación visual ofrecerá, en este caso,

mayor exactitud que la digital. En otras categorías, la relación resulta contraria, ya que el ojo humano no es capaz de detectar variaciones tonales que sí son diferenciables numéricamente (humedales, transiciones de vegetación, distintos cultivos...).

Otro elemento a tener en cuenta para elegir la intepretación visual o digital, se refiere al tipo y continuidad de las tareas requeridas en el proyecto. Si el estudio sólo precisa un croquis de interpretación y no una plasmación cartográfica, la interpretación visual no ofrece inconvenientes. Ahora bien, si se pretende obtener un mapa deben transferirse todas las líneas que definen las distintas cubiertas a la cartografía base, lo cual resulta muy tedioso y casi siempre poco preciso, mediante restitución visual. El tratamiento digital, por el contrario, permite realizar este proceso con gran rapidez y —salvo terrenos muy accidentados— elevada precisión, gracias a las técnicas de corrección geométrica de la imagen (6.5.3). Lógicamente, estas correcciones digitales pueden aplicarse como paso previo a la interpretación visual, pero esto requeriría realizar las inversiones antes aludidas para el tratamiento asistido por ordenador. Recientemente, algunos centros distribuidores han comenzado a facilitar imágenes de satélite ya corregidas, lo que permite obviar esta restitución en el análisis visual, si bien sólo en el caso de sensores de alta resolución.

Otras operaciones que resultan muy beneficiadas con el tratamiento digital son el inventario de resultados y su integración con otras variables geográficas. El inventario resulta muy tedioso en interpretación visual, pues es necesario planimetrar todas las superficies incluidas en cada tipo de cubierta. En el caso del tratamiento digital basta realizar un cálculo de frecuencias —esto es, del número de píxeles incluidos en cada clase—, para conocer la superficie ocupada por cada una de ellas, por cuanto sabemos la equivalencia superficial de cada píxel. Respecto a la posibilidad de combinar los resultados del análisis con otro tipo de variables territoriales: suelos, hidrografía o pendientes, la integración manual resulta muy compleja (técnica de superponibles), mientras la asistida por ordenador supone un proceso relativamente sencillo, en el marco de los denominados Sistemas de Información Geográfica (SIG, cap. 9). Como tendremos ocasión de estudiar, la entrada de información en estos Sistemas requiere una previa digitización para el caso del análisis visual, mientras resulta un proceso bastante inmediato en tratamiento digital —especialmente si el SIG almacena la información en formato raster— puesto que las imágenes ya se encuentran en formato numérico.

En resumen, y siguiendo nuestra opinión particular, ambos métodos de trabajo se complementan. El tratamiento digital permite realizar operaciones complejas, muy costosas o inaccesibles al análisis visual. Garantiza una clasificación más rápida de la zona de estudio, manteniendo una coherencia en la asignación de áreas vecinas a dos categorías. Por su parte, el análisis visual es una buena alternativa para actualizar cartografía existente o realizar inventarios a escalas

medias. Auxilia a la clasificación digital para evitar confusiones entre coberturas heterogéneas, o entre aquellas que son similares espectralmente pero de distinto significado temático. El tratamiento digital supone una fuerte inversión de entrada, pero los costes van disminuyendo al aumentar la superficie analizada. Por el contrario, los costes del análisis visual son lineales, suponiendo una débil inversión de partida. Con estos planteamientos, la inversión en equipos informáticos parece justificada en tres casos: (i) cuando el objeto o la escala del estudio no sea abordable mediante análisis visual, (ii) cuando se pretendan obtener modelos biofísicos, detección de cambios o medición numérica de la estructura del territorio, y (iii) cuando se pretenda introducir los resultados en un Sistema de Información Geográfica.

4.2.4. Reconocimiento y verificación: el papel de los trabajos de campo

Las aplicaciones de la teledetección espacial son muy numerosas, por lo que resulta complejo establecer un marco general, que pueda ser válido para todas ellas. No obstante, y aun a riesgo de caer en la simplicidad, puede ser conveniente introducir algunas ideas sobre el proceso de trabajo con este tipo de imágenes. No será difícil que cada usuario pueda ajustar este esquema a sus propios intereses.

El proceso propuesto contempla las siguientes fases (fig. 4.6):

(i) Definición expresa y concreta de objetivos, señalando las limitaciones que se presentan, ya sean derivadas del área de estudio, ya del tiempo o escala requeridos en el trabajo o de los medios disponibles.

(ii) Propuesta metodológica, en función de la literatura consultada sobre el tema. Un estudio bibliográfico resulta vital para orientar el proceso de análisis, evitando inversiones innecesarias.

(iii) Trabajos de campo preparatorios y acopio de información auxiliar. En este primer contacto, los trabajos de campo permiten familiarizar al intérprete con la zona objeto de estudio, estudiar sus rasgos medio ambientales y humanos. Si se trata de una aplicación relacionada con la cubierta vegetal, resulta conveniente elaborar un calendario fenológico de las especies de interés con objeto de seleccionar la fecha o fechas más apropiadas para adquirir la imagen. En esta fase pueden incluirse las medidas a realizar con radiómetros de campo —que permiten caracterizar espectralmente la cubierta y seleccionar el sensor y las bandas más apropiadas para discriminarla—, así como el acopio del material auxiliar necesario para la posterior interpretación de la imagen.

(iv) Selección de la información: sensor y fecha más conveniente, número de imágenes, soporte, número y localización espectral de las bandas, etc.

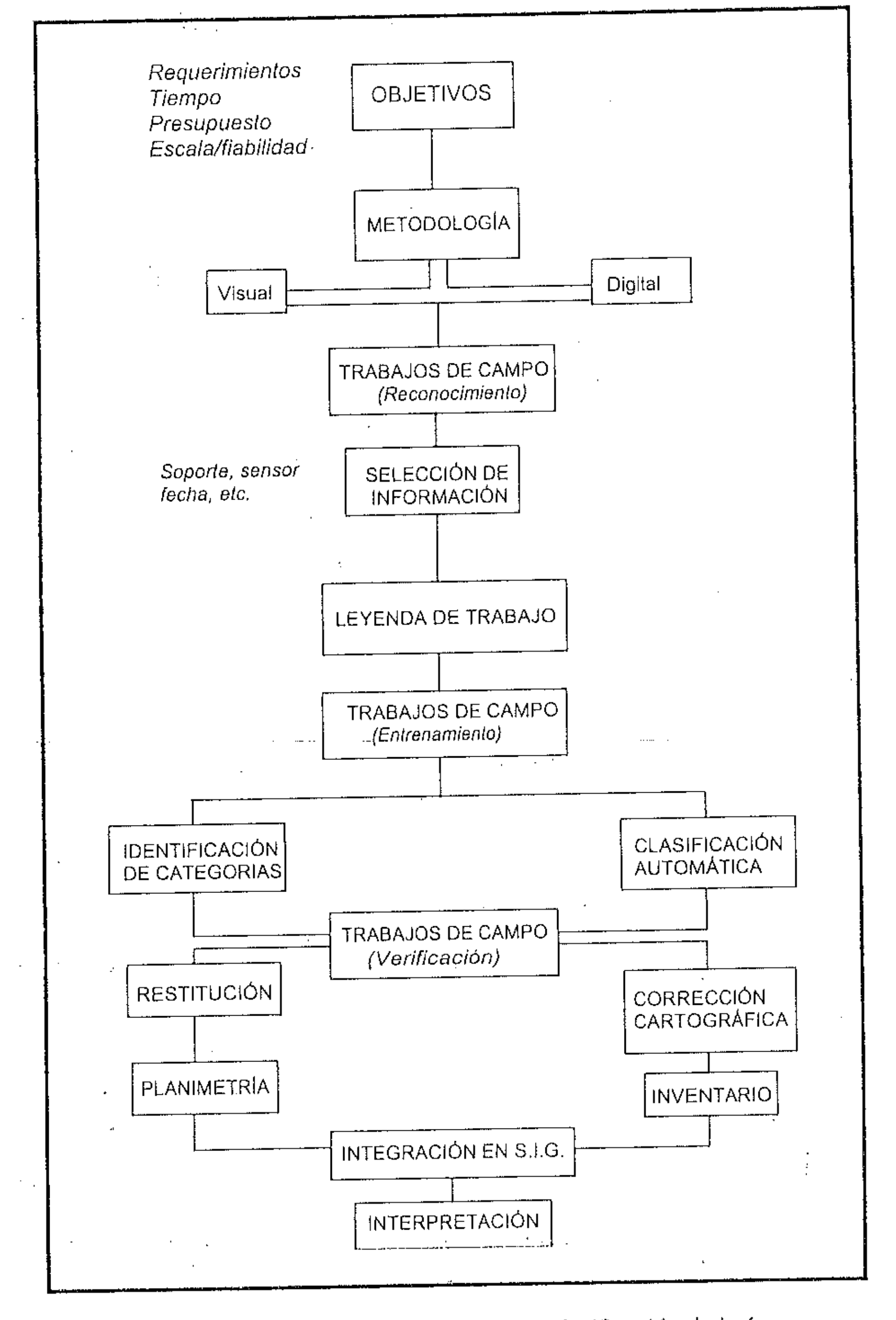


Fig. 4.6 - *Fases que incluye un proyecto de clasificación de imágenes*

(v) Selección de la leyenda de trabajo, basada sobre las características de la zona y las posibilidades que brinda el sensor seleccionado.

(vi) Trabajos de campo. Una vez adquiridas las imágenes, esta segunda fase de campo sirve para familiarizar al intérprete con la imagen, caracterizando sobre ella la variación de las distintas clases señaladas en la fase anterior.

(vii) Interpretación de estas cubiertas, ya sea a través del análisis visual, ya del tratamiento digital, extendiendo al resto de la imagen la experiencia acumulada en el muestreo de campo realizado previamente.

(viii) Revisión de campo, para la verificación de resultados, de acuerdo al porcentaje de fiabilidad requerido y a la tasa de error tolerable en el muestreo. Esta fase puede también abordarse en la fase (vi) siempre que no se empleen las mismas áreas para clasificar y para verificar la imagen (ver cap. 8).

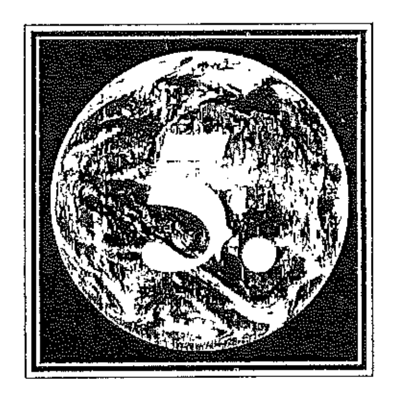
(ix) Restitución. Una vez obtenidos unos resultados suficientemente fiables, se trata de otorgar validez cartográfica a los resultados; esto es, que el documento obtenido pueda superponerse sobre la cartografía base. Esta restitución puede ser digital o analógica, en función del método seguido en el análisis, si bien, como hemos indicado, también puede realizarse interpretación visual a partir de imágenes ya corregidas cartográficamente.

(x) Integración de los resultados obtenidos con otro tipo de variables espaciales. Esto supone la digitización de la cartografía final o, en caso de tratamiento digital, las modificaciones precisas para que se ajuste perfectamente a la cartografía convencional disponible (cambios de proyección y/o resolución).

(xi) Inventario. Aquí se trata de cuantificar la extensión superficial de cada una de las categorías, una vez se hallen representadas sobre un mapa de escala conocida. Al igual que en la fase anterior, el procedimiento variará de acuerdo al método de análisis: conteo de frecuencias (digital), o planimetría (visual); si bien, en caso de que se hayan digitizado previamente los polígonos identificados visualmente, el inventario también se obtiene automáticamente.

(xii) Interpretación de la cartografía resultante, poniéndola en relación con las variables humanas y del medio físico que afectan al área de estudio.

Como puede observarse, este esquema está bastante centrado en aquellas aplicaciones que persigan elaborar una cartografía temática a partir de la teledetección. Geógrafos, biólogos, agrónomos, forestales, edafólogos o cartógrafos, pueden incluirse en este grupo, por lo que parece suficientemente amplio para una gama variada de expertos.



Interpretación Visual de Imágenes

«El fanático comienza por no pedir razones y acaba por no tolerarlas.»

[Izrail Metter, *La Quinta Esquina*]

Para la mayor parte de los lectores de esta obra, así como para el propio autor, el aspecto más importante de la teledetección es el aprovechamiento temático de las imágenes. En consecuencia, los capítulos que siguen constituyen el eje sobre el que gira este tratado.

Ya en el capítulo anterior se comentaron los rasgos principales de esta labor interpretativa. Allí se presentaban las dos alternativas para analizar los datos adquiridos por el sensor: (i) abordar una interpretación visual, y (ii) optar por el tratamiento digital de la imagen. En el presente apartado se estudia con más profundidad la interpretación visual de imágenes, para pasar, en los dos próximos, a exponer los principios del tratamiento digital. La mayor parte de los comentarios incluidos en este capítulo se refieren a imágenes adquiridas por diversos sensores de la familia Landsat. El amplio rango de aplicaciones que ofrecen y la extensión de su empleo justifican esta elección. No obstante, la mayor parte de las ideas aquí expresadas pueden fácilmente aplicarse a imágenes adquiridas por otros sensores, especialmente a aquéllos comprendidos en el dominio óptico, y de similar resolución a los incluidos en el programa Landsat (SPOT-HRV, MOS-MESSR, IRS-LISS, etc.).

5.1. Familiarización con imágenes analógicas

5.1.1. Información incluida en los productos fotográficos

Una interpretación detallada de imágenes requiere tener en cuenta los principales rasgos de su adquisición, así como de los tratamientos que puedan haber abordado las antenas receptoras. Este tipo de información está incluida en el documento analógico que sirve de base a la interpretación visual.

Las anotaciones que incluye una imagen difieren según el sensor que la adquiere y la organización que la procesa. La agencia espacial norteamericana NASA se encargó de recibir las primeras imágenes adquiridas por el satélite Landsat, canalizando, a través del *EROS Data Center (U.S.Geological Survey)*, su distribución. En estos años, las imágenes en papel o negativo incluían la siguiente información auxiliar:

- Fecha de adquisición (2 de febrero de 1975, en el ejemplo de la figura 5.1).
- Coordenadas del centro de la imagen (37° 21' Norte y 8° 26' Este).
- Coordenadas del punto nadir (punto de intersección entre la superficie terrestre y una perpendicular desde el centro de adquisición).

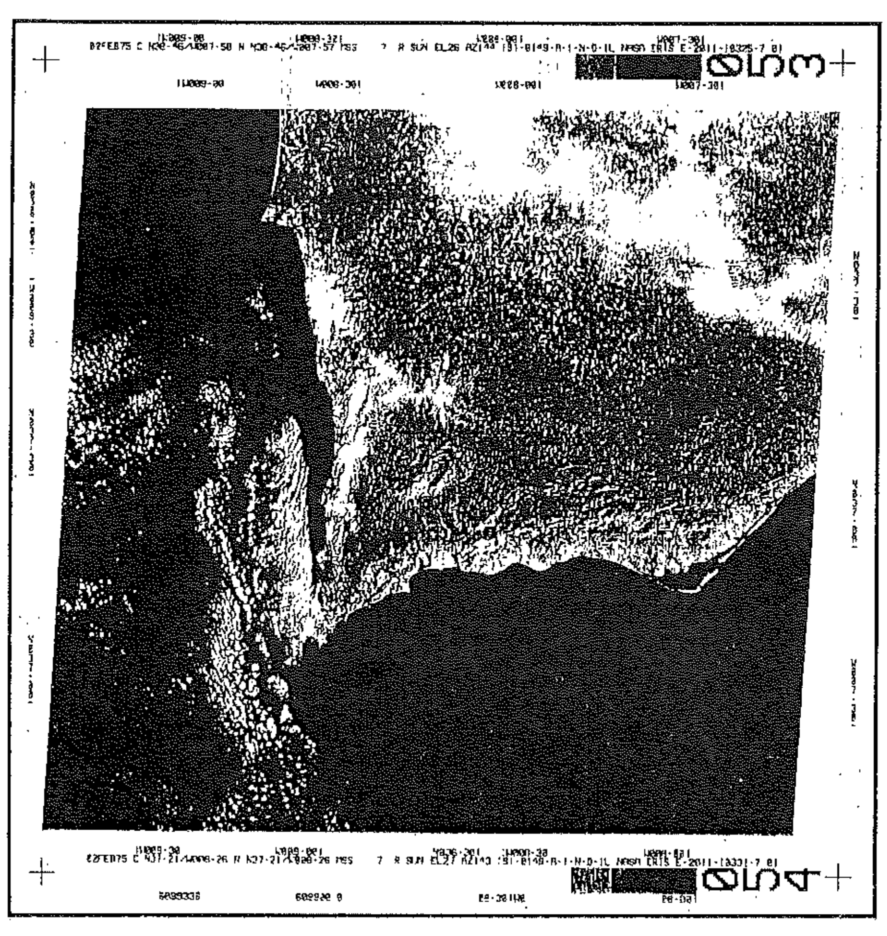


Fig. 5.1 - *Imagen Landsat de la costa portuguesa en el formato original de NASA (Cortesía R.Núñez - Inst. Geográfico Nacional)*

- Sensor y banda empleada (MSS, banda 7).
- Ángulo de elevación solar, medido entre la horizontal y la dirección de los rayos solares (26°).
- Ángulo acimutal, medido desde el norte geográfico y en el sentido de las agujas del reloj (143°).
- Datos del procesado (correcciones aplicadas, escala, proyección, compresión o no de los datos, etc.).
- Agencia y proyecto (NASA ERTS).
- Código de identificación de la escena (número de satélite, días transcurridos desde el lanzamiento, hora, minutos y segundos de la adquisición: E - 2011 - 10331 - 7 01).

Debajo de estos datos se situaba una escala de grises, con objeto de comprobar la calidad de la reproducción.

En los años ochenta, otras agencias espaciales comenzaron a encargarse de la distribución de imágenes. Para toda Europa, la Agencia Espacial Europea (ESA) se responsabilizó de la recepción de los datos, gracias a sus estaciones de Fucino, Trömsø y Maspalomas, mientras el programa EARTHNET se hacía cargo de la red distribuidora.

Como consecuencia de esto, se modifican las anotaciones en los productos fotográficos del satélite Landsat, ajustándose al siguiente esquema (fig. 5.2):

- Escala de grises en el borde inferior de la imagen.
- Por debajo de ella se incluye información sobre fecha de adquisición, número de satélite, código de identificación de la escena y banda. En el caso de la figura 5.2, la imagen se adquirió el 29 de enero de 1982 por el satélite Landsat-2, la escena se reconoce por los números 217 (órbita) y 032 (fila), y corresponde a la banda 5. En el margen derecho, se sitúa el centro y fecha de tratamiento (Telespazio, 26 de Mayo de 1982).

A partir del lanzamiento de los Landsat-4 y 5, se vuelve a modificar la información auxiliar que incluyen los productos fotográficos, enriqueciéndose notablemente frente al anterior formato. Desde ese momento, la red europea EARTHNET recoge los siguientes datos (fig. 5.3):

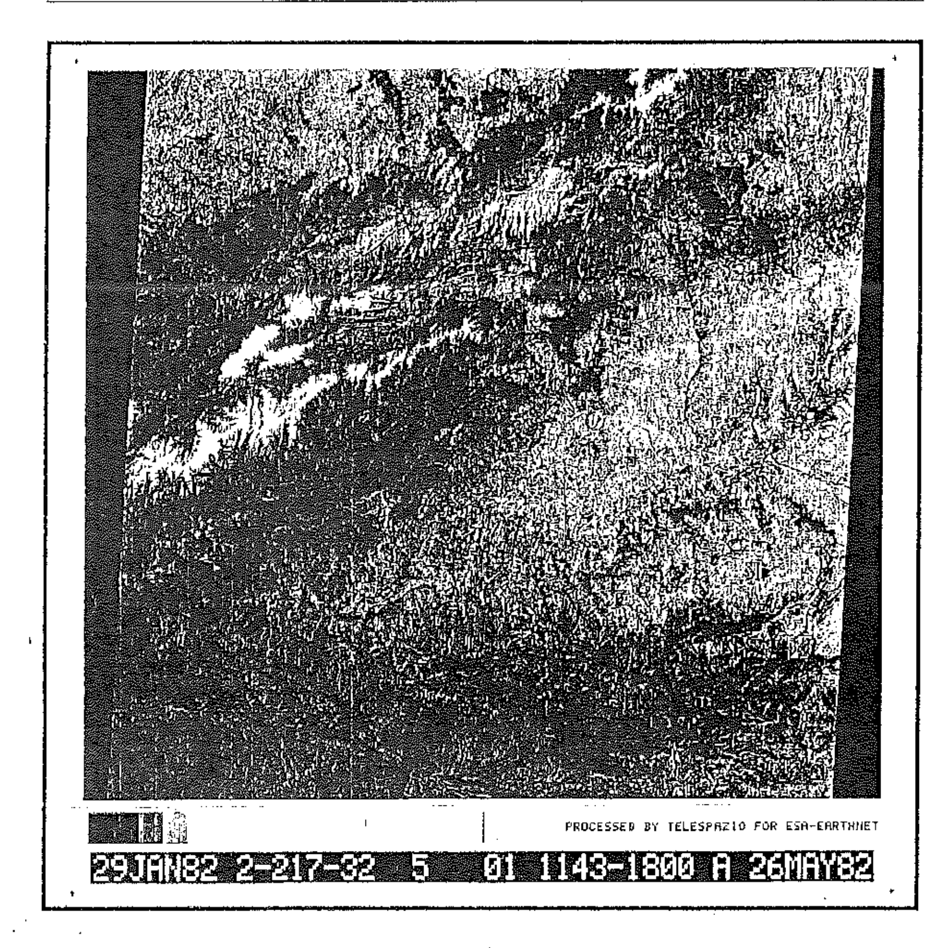


Fig. 5.2 - *Imagen Landsat en el formato original de la E.S.A*

- En la cabecera del negativo se señalan los datos más importantes de la adquisición: fecha, satélite, sensor, número de banda, código de la escena y, en su caso, número de cuadrante. En el caso de la figura 5.3, se trata de una imagen adquirida el 2 de agosto de 1984, por el satélite Landsat-5, sensor TM (*Thematic Mapper*), correspondiente a la banda 1, traza 201, fila 032, cuadrante 2.

- En el borde inferior, aparece la escala de grises (indicando, además, el valor digital al que corresponde cada intensidad), centro y fecha de proceso y escala gráfica.

- Por fin, la última línea del negativo incluye algunos datos auxiliares, como son la fecha de adquisición, coordenadas del centro de la escena, ángulo de elevación y acimut solar, nivel de corrección radiométrica y

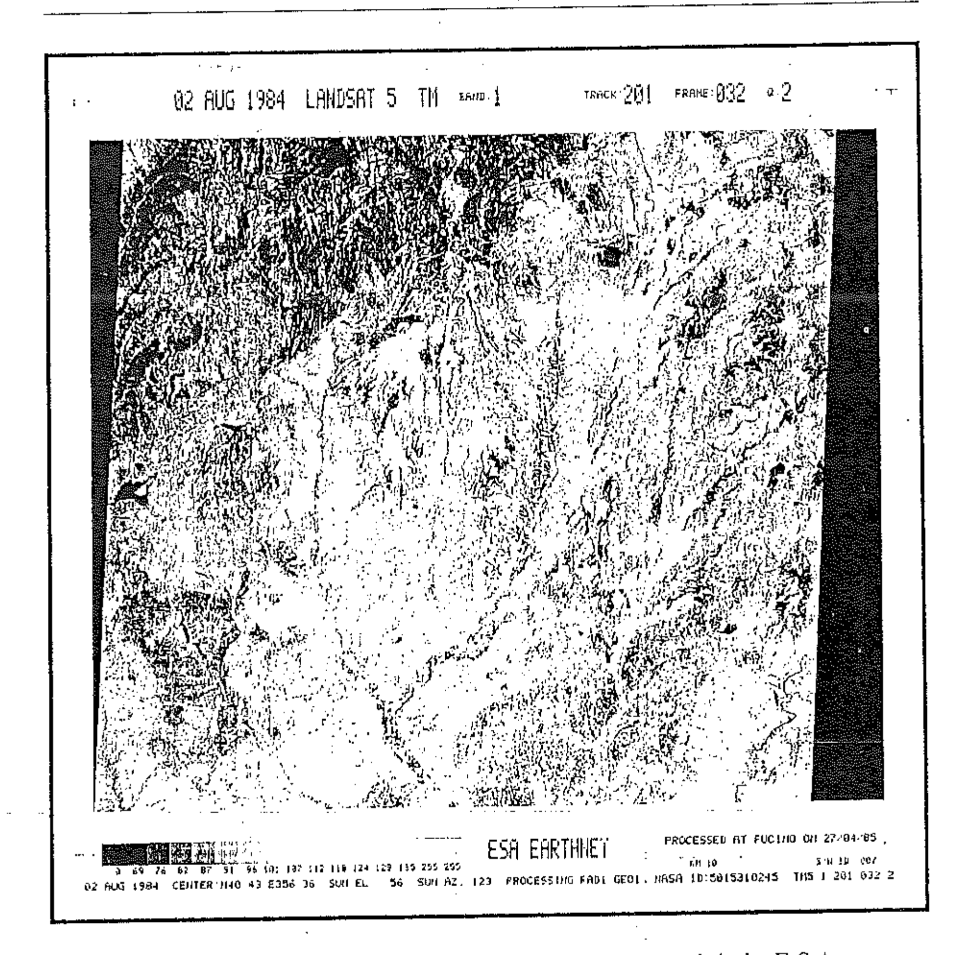


Fig. 5.3 - *Imagen Landsat-TM en el formato actual de la E.S.A.*

geométrica, e identificación de la escena, en el código NASA y en el sistema europeo.

5.1.2. Identificación de algunos rasgos geográficos sobre la imagen

Con estos datos, ya estamos en disposición de comenzar el análisis de la imagen. Una primera forma de familiarizarse con su significado será referenciarla geográficamente; esto es, localizar sobre la imagen rasgos identificables sobre un mapa convencional. Este ejercicio puede abordarse en varias fases. En la primera, apoyándose en un mapa de similar escala, pueden situarse los embalses y cursos de agua más importantes de la zona. A partir de ellos, una segunda inspección de la imagen permite identificar aspectos humanos del territorio, como son las ciudades más importantes y las principales vías de

comunicación. Los accidentes montañosos se identificarán en una tercera fase, puesto que se trata de aspectos representados más abstractamente en el mapa y, por tanto, de difícil delimitación. Masas de vegetación o rasgos efímeros relacionados con la imagen (como, por ejemplo, incendios o agentes contaminantes), podrán interpretarse en una última fase, puesto que rara vez vendrán recogidos en el mapa. En la localización de todos estos aspectos conviene apoyarse sobre una retícula de referencia, tal y como aparece en la figura 5.4. En este caso, se trata de un fragmento de una imagen MSS, adquirida el 15 de julio de 1981, correspondiente al centro de España. El mapa adjunto está diseñado a una escala similar (originalmente a 1:1.000.000), y permite apoyar el presente ejercicio. Una primera inspección de la imagen servirá para situar los principales embalses de la zona: Santa Teresa (B7), Rosarito (E13), Valdecañas (E17), Castejón (Q15), Santillana (R2) y San Juan (N9). A partir de ellos, no es difícil reconstruir el trazado de los cursos fluviales: Tiétar, Alberche, Guadarrama, Jarama y Tajo.

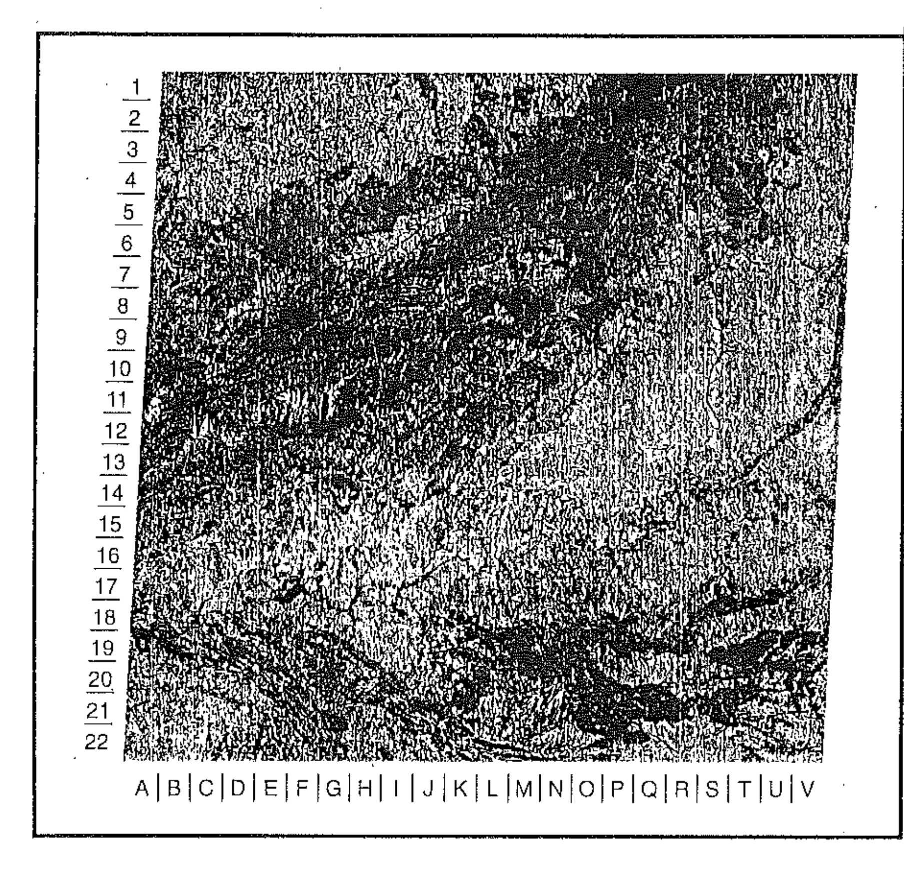


Fig. 5.4a - *Imagen MSS sobre la zona centro*

Estos cursos facilitan la localización de la ciudad de Madrid (T5), con su aeropuerto (U4), y las de Toledo (S14), Talavera (K15) y Ávila (S5), así como de las principales autovías nacionales.

Los Montes de Toledo ocupan el borde inferior de la imagen, mientras el Sistema Central, y concretamente la Sierra del Guadarrama al Noreste y Gredos al Oeste, se sitúa en el margen superior. La ocupación vegetal de la zona puede extraerse —muy a grandes rasgos— a partir de los tonos de gris que presenta la imagen. Se identifican las masas forestales del Monte del Pardo y de las áreas montañosas, con tonos gris medio a oscuro. En contraste con ellas, los valles se ocupan por tonos mucho más claros, testigo de cultivos herbáceos por haberse producido ya la recolección.

Este pequeño ejercicio sirve de preámbulo para analizar los criterios empleados en el análisis visual de imágenes.

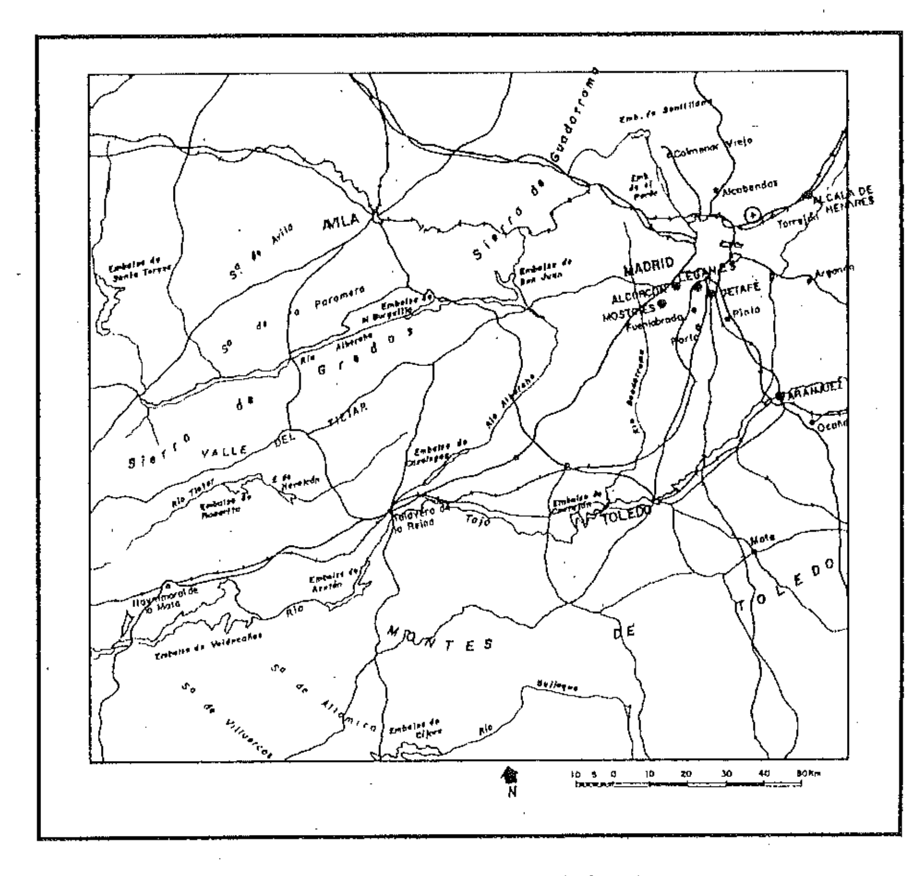


Fig. 5.4b - *Croquis cartográfico de la misma zona*

5.2. CRITERIOS VISUALES PARA IDENTIFICAR CUBIERTAS

Como ya tuvimos ocasión de comentar anteriormente (4.3), una de las principales ventajas del análisis visual sobre el digital es su capacidad para incorporar a la interpretación de la imagen criterios complejos. Mientras el tratamiento digital se basa, casi exclusivamente, sobre la intensidad radiométrica de cada píxel —en las distintas bandas utilizadas para la interpretación—, el análisis visual puede utilizar otros elementos, como son la textura, estructura, emplazamiento o disposición, muy difíciles de definir en términos digitales.

Estos criterios nos permiten discriminar categorías con un comportamiento espectral parejo, aunque con un significado temático bien distinto. Por ejemplo, algunos cultivos en regadío suelen ofrecer una respuesta espectral muy parecida a los parques urbanos, ya que ambas cubiertas están formadas por las mismas o similares especies vegetales. Sin embargo, su significado temático es claramente distinto, y así debe incluirse en la cartografía final. Digitalmente la distinción es compleja, pues los valores numéricos de ambas cubiertas son muy similares. Ahora bien, basta incorporar un criterio visual sencillo, como es el contexto geográfico, para separarlas. Las técnicas de la denominada 'inteligencia artificial' pretenden incorporar estos criterios más complejos al tratamiento numérico de los datos, como luego veremos, pero aún los desarrollos están en fase experimental.

Entre las pautas visuales manejadas en teledetección espacial, algunas son comunes con la fotografía aérea —tono, textura, estructura, sombras, contexto, etc.—, otras son más propias de las imágenes espaciales, principalmente en lo que atañe a la dimensión multi-espectral y multi-temporal de las observaciones, severamente limitada en fotografía aérea, y un último grupo corresponde a criterios tradicionales en foto-interpretación que rara vez resultan accesibles en imágenes espaciales, como es el caso de la cobertura estereoscópica, tan vital para estudios del relieve. En cualquier caso, ya sean nuevos o tradicionales, los criterios visuales deben manejarse con cierta precaución en imágenes de satélite, por cuanto las escalas de trabajo y la geometría de adquisición son muy distintas a las empleadas en fotografía aérea.

5.2.1. TONO

El tono, como es sabido, hace referencia a la intensidad de energía recibida por el sensor para una determinada banda del espectro. En un producto fotográfico, los píxeles con tonos oscuros indican aquellas áreas sobre las que el sensor detectó una débil radiancia, mientras las zonas claras son producto de una mayor intensidad. En otras palabras, el tono se relaciona estrechamente con el comportamiento espectral de las distintas cubiertas, para la banda particular del espectro sobre la que se trabaje.

En consecuencia, el tono característico de una cubierta varía con la banda del espectro considerada. Una superficie ocupada por vegetación vigorosa ofrece tonos oscuros en las bandas visibles del espectro, especialmente en el azul y rojo, como consecuencia de la alta absortividad de los pigmentos de la hoja en esas longitudes de onda (2.5.2). Por el contrario, aparece en tonos claros si la imagen corresponde al infrarrojo cercano, por cuanto, en esa región del espectro, la hoja sana ofrece una elevada reflectividad. En consecuencia, para interpretar los tonos que ofrece la imagen se ha de tener presente el comportamiento espectral de las distintas cubiertas de interés. De otra forma, el intérprete puede entrenarse a reconocer mecánicamente algunas categorías, pero no alcanzará a comprender plenamente las razones de las diferencias tonales que observa.

Un intérprete avezado podrá reconocer múltiples categorías por el contraste de tonos en distintas bandas del espectro. Como hemos visto, la vegetación tiende a ofrecer tonos oscuros en las bandas visibles y muy claros en el infrarrojo cercano, mientras el agua presenta tonos oscuros en ambas, y los suelos descubiertos ofrecen tonos blancos en las dos (fig. 5.5). Una mayor experiencia permite seleccionar las bandas más idóneas para reconocer determinados rasgos de interés: modelos de drenaje y morfología (infrarrojo cercano), trazado urbano (verde-rojo), turbidez en el agua (azul), delimitación tierra/agua (infrarrojo cercano), vegetación (rojo e infrarrojo cercano).

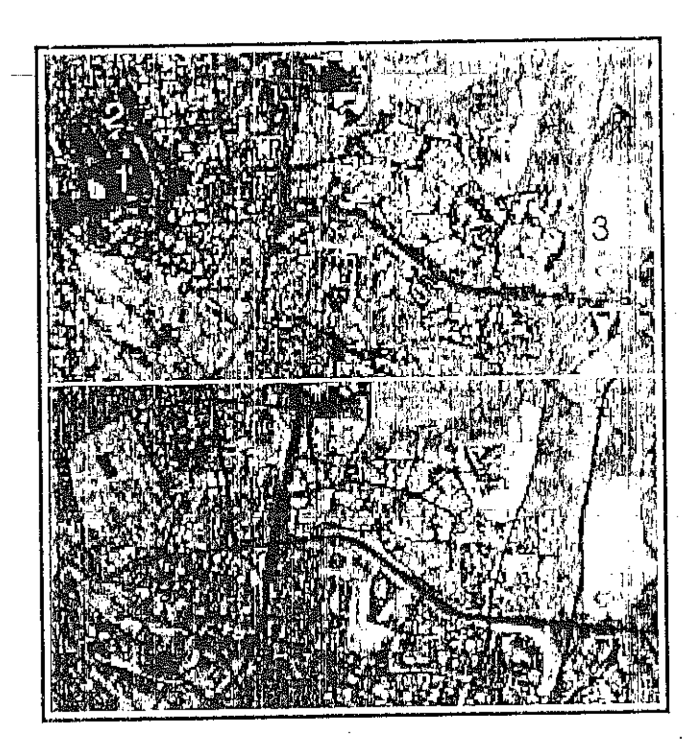


Fig. 5.5 - *Tono y signaturas espectrales. (1) Vegetación sana; (2) Agua; (3) Suelos desnudos. La imagen superior corresponde a la banda azul (TM1) y la inferior al infrarrojo cercano (TM4).*

A partir de estas ideas, parece evidente que el tono es uno de los principales criterios de interpretación visual. Pese a ello, una representación fotográfica de una imagen siempre supone una pérdida considerable de los tonos originalmente detectados por el sensor. Como ya vimos en 3.2, la mayor parte de los satélites de recursos naturales cuentan con sensores de alta resolución radiométrica. Dicho de otra forma, en la imagen original se distinguen hasta 256 niveles de intensidad —o, si se prefiere, de tonos de gris— en cada una de las bandas del espectro sobre las que se adquiere información. La representación fotográfica de esa imagen nunca recoge tantos niveles de gris, entre otras cosas porque el ojo humano no sería capaz de distinguirlos. Habitualmente, las imágenes fotográficas incluyen hasta 128 niveles de gris, pero no todo este rango es perceptible por el ojo humano, lo que implica una menor sensibilidad para reconocer cubiertas —atendiendo sólo a este criterio— de la que el sensor originalmente detecta. En otras palabras, el análisis visual siempre es menos preciso que el digital para diferenciar los contrastes de intensidad presentes en la imagen.

5.2.2. Color

Varios autores han puesto de manifiesto que el ojo humano es más sensible a las variaciones cromáticas que a la intensidad luminosa (Barret y Curtis, 1992; Jiménez y García, 1982). Si a esto añadimos el aumento de información que supone la mezcla de varias bandas del espectro, fácilmente se comprende que el color resulta un elemento básico en la interpretación visual de imágenes.

Como es bien sabido, el color que aprecian nuestros ojos es fruto de la reflectividad selectiva de los objetos a distintas longitudes de onda. Aquellas superficies con alta reflectividad en longitudes de onda cortas, y baja en el resto, aparecen con color azul, mientras ofrecen un tinte rojo si absorben las longitudes cortas y reflejan las largas. Nuestro ojo sólo percibe las longitudes de onda comprendidas entre 0,4 y 0,7 µm, separando la energía recibida en tres componentes de acuerdo a la sensibilidad espectral de nuestras células sensoras. Esos tres componentes son los denominados colores primarios: azul, verde y rojo, a partir de los cuales puede reconstruirse cualquier otro color del arco iris.

Una impresión similar al color se obtiene con cualquier instrumento que permita separar esas tres bandas del espectro, aplicando a cada una uno de los tres colores elementales. Éste es el criterio que se sigue en las composiciones coloreadas, en donde se aplican los colores primarios a tres bandas captadas por el sensor, en el orden y criterio que se estime más oportuno (fig. 5.6*). Si el sensor recoge información sobre las bandas del espectro azul, verde y rojo, puede obtenerse una composición en color natural. De otra forma, la composición coloreada no se ajusta a los colores que aprecian nuestros sentidos, aunque puede ser —y, de hecho, así suele ser— más interesante desde el punto de vista interpretativo.

Independientemente de las bandas que se incluyan en la composición, conviene considerar algunos aspectos sobre el proceso que permite obtener esas composiciones en color. La mezcla de tres bandas espectrales en una composición en color puede conseguirse de acuerdo a dos procesos, denominados aditivo y sustractivo. En el proceso aditivo, cualquier color se obtiene por suma de los tres colores elementales: azul, verde y rojo. La suma de dos colores primarios permite lograr un color complementario: azul+verde=cian; azul+rojo=magenta, y verde+rojo=amarillo, mientras los tres suman el blanco (fig. 5.7a). Por el contrario, el proceso sustractivo se basa en la absorción de la luz que ejercen los colores complementarios: el cian absorbe la luz roja, el magenta absorbe el verde y el amarillo el azul. Los tres en combinación suponen, por tanto, el negro (fig. 5.7b).

El proceso aditivo es el utilizado en los sistemas electrónicos de visualización, cuando la imagen se representa en un monitor de rayos catódicos. Este es el proceso habitual en un equipo de tratamiento digital de imágenes. Por su parte, el proceso sustractivo se emplea en la reproducción mecánica del color, típica de las artes gráficas. Por tanto, cuando se pretenda imprimir una imagen resulta preciso aplicar a cada banda uno de los colores complementarios. Por ejemplo, para obtener una composición en falso color, debe aplicarse a las bandas del espectro IRC/R/V los colores complementarios amarillo, magenta y cian, respectivamente. Si, por el contrario, se requiere visualizar esa imagen sobre un monitor, el orden será rojo, verde y azul, para las mismas bandas.

Entre las múltiples combinaciones de color que se han empleado en análisis visual, la más destacada sin duda es la denominada falso color o infrarrojo color. Se obtiene desplazando hacia longitudes más largas las bandas del espectro visible. En lugar de aplicar los colores azul, verde y rojo a sus respectivas bandas

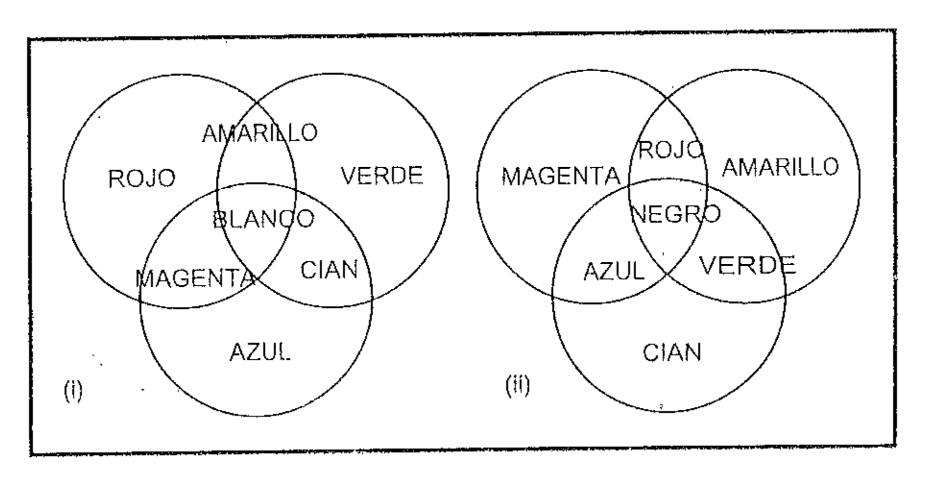


Fig. 5.7 - *Procesos de formación del color: (i) aditivo, (ii) sustractivo*

del espectro, se aplican a las bandas verde (V), rojo (R) e infrarrojo cercano (IRC), respectivamente. Esto supone originar una clave de color nueva, extraña a la forma habitual con la que apreciamos el color, pero de gran valor temático.

Su profuso empleo se relaciona con la resolución espectral de la mayor parte de los sensores espaciales. Desde el inicio de la serie Landsat, se han venido distribuyendo imágenes en falso color, por cuanto el sensor MSS sólo permitía esta composición, al no adquirir información en otras bandas del espectro. Éste es también el caso de los sensores instalados en los satélites SPOT, MOS o IRS, por lo que sigue siendo la composición multibanda más frecuente.

Aunque más tarde comentaremos el significado de los colores que aparecen en este tipo de composición, puede ser conveniente incluir una simple clave de color, con objeto de familiarizar al intérprete con este tipo de representaciones. Las tonalidades más habituales en ella se corresponden con las siguientes cubiertas (Tindal, 1978):

- Rojo-magenta. Denota vegetación vigorosa, como cultivos regados, prados de montaña o bosques de caducifolias en imágenes de verano, y cultivos herbáceos de secano en imágenes de primavera. El estudio detallado de la intensidad y saturación del rojo permite identificar diversas cubiertas vegetales, así como estimar su ciclo de crecimiento y vigor.

- Rosa. Muestra áreas vegetales menos densas y/o vegetación en temprano estado de crecimiento. Las áreas suburbanas en torno a las grandes ciudades, con sus pequeños jardines y árboles diseminados, aparecen a veces en ese color.

- Blanco. Areas de escasa o nula vegetación pero de máxima reflectividad: nubes, arenas, depósitos salinos, canteras, suelos desnudos.

- Azul oscuro a negro. Superficies cubiertas total o parcialmente por agua: ríos, canales, lagos, embalses. En zonas volcánicas, los tonos negros pueden asimismo identificar flujos de lava.

- Gris a azul metálico. Ciudades o áreas pobladas, si bien puede asimismo tratarse de roquedo desnudo.

- Marrón. Vegetación arbustiva, muy variable en función de la densidad y del tono del sustrato. Los tonos más oscuros indican presencia de materiales paleozoicos (pizarras), mientras los matorrales calcícolas, menos densos normalmente, ofrecen una coloración más clara.

- Beige-dorado. Identifica zonas de transición: prados secos, frecuentemente asociados con el matorral ralo.

Cuando se comenzaron a adquirir imágenes del sensor TM, se abrió la posibilidad de diseñar nuevas composiciones. La inclusión de una banda en el azul (A) permite al TM obtener composiciones en color natural (R,V,A), mientras sus nuevas bandas en el infrarrojo medio y térmico, amplían notablemente las posibilidades de combinar información multi-banda. Con motivo de ello, varios autores han intentado establecer algún indicador, más o menos objetivo, que ayude a seleccionar las bandas más idóneas para una composición en color. Los criterios más estudiados son los de tipo estadístico: análisis de componentes principales, índice óptimo de máxima variación, y obtención de los ejes del elipsoide de variación (6.6.3).

En el terreno del análisis visual, también se han efectuado algunos ensayos para identificar la composición de color que ofrece una mejor discriminación de cubiertas. Se parte de seleccionar intérpretes con distintos grados de experiencia, para cuantificar el número de cubiertas que discriminan adecuadamente en distintas composiciones de color (Benson y Degloria, 1984; Trolier y Philipson, 1986). En estos test, y para el caso del Landsat-TM, las combinaciones más puntuadas incluyen una banda del espectro visible, otra del infrarrojo cercano y otra del medio. El orden habitual es aplicar el color rojo al infrarrojo cercano (TM4), el verde al infrarrojo medio (TM5) o al rojo (TM3), y el azul al rojo (TM3) o verde (TM2). Estos resultados son muy similares a los obtenidos por otros autores mediante técnicas estadísticas (Hord, 1986). A tenor de este resultado, el proyecto de cartografía de ocupación del suelo de España (dentro del programa europeo CORINE-*Land Cover*) seleccionó la composición TM 4/5/3 (IRC, IRM, R) como base para la interpretación visual de imágenes. Para objetivos parciales, puede ser interesante considerar otro tipo de combinaciones coloreadas. A partir de imágenes TM, se han comprobado la eficacia de la composición formada por las bandas 4/7/5, para detectar zonas quemadas, de la integrada por las bandas 7/4/3 para discriminación cultivos en regadío o zonas encharcadas, y de la constituida por las bandas 7/3/1, para aplicaciones oceanográficas. Pese al interés de estas composiciones, sigue vigente el papel protagonista de la combinación en falso color tradicional (IRC, R, V), puesto que es la única disponible en la mayor parte de los sensores de interés medio ambiental, además de garantizar una buena discriminación de las cubiertas vegetales[1].

En la figura 5.8* aparecen diversas composiciones coloreadas de una imagen adquirida por el sensor TM del satélite Landsat-5 sobre la ciudad de

[1] El orden de colores, en todos los casos, es rojo, verde y azul.

...rid y alrededores. Se han seleccionado a modo de ejemplo una composición ...n color natural, en falso color convencional, y en falso color mejorado (infrarrojo ...rcano, infrarrojo medio y rojo). Como observamos en esta figura, cada compo... ...ción de bandas proporciona una información particular para discriminar las ...bierturas presentes en la zona: El color natural ofrece un escaso contraste, presen... ...ndo tonos verde-oscuros para la vegetación y pardos para las zonas urbanas y ...elos descubiertos (5.8a*). La discriminación de la cobertura vegetal es mucho ...ás evidente en el falso color convencional y mejorado (5.8b y c*). En ambos ...sos, la vegetación más vigorosa aparece en tonos de rojo, ya que a éste cañón de ...olor se asigna el infrarrojo cercano. Son bastante claros los parques urbanos de ...dad (Retiro, del Oeste, jardines del Moro, parque de Roma), así como las ...stas de golf del club Puerta de Hierro y Somosaguas. En tonos marrón-ocre ...parecen las áreas cubiertas por perennifolios (pinares y encinares del Monte del ...ardo y Casa de Campo). En la combinación infrarrojo cercano, infrarrojo medio ...rojo, estas áreas ofrecen tonos verdosos, al presentar una escasa humedad en ...sta época del año. En esta composición resulta algo más evidente el área edificada, ...contrasta mejor la vegetación natural de la que acompaña a las áreas residencia... ...es, como puede observarse hacia el Oeste de la imagen (Boadilla del Monte, Somosaguas).

La figura 5.8d* corresponde a un falso color realzado pero cambiando la asignación de colores. Se trata, en definitiva, de la misma composición incluida en 5.8c*, pero asignando el color verde al infrarrojo cercano y el rojo al medio. En consecuencia, la vegetación más vigorosa aparece en tonos de verde, en lugar de en tonos de rojo. Este criterio es el empleado por el Instituto Geográfico Nacional para publicar su serie de imágenes de toda España, sobre la base de facilitar al intérprete poco experimentado —acostumbrado a ver la vegetación en tonos de verde— el análisis de la imagen.

5.2.3. Textura

Esa cualidad se refiere a la aparente rugosidad o suavidad de una región de la imagen; en definitiva, al contraste espacial entre los elementos que la componen. La textura de la imagen procede de la relación entre el tamaño de los objetos y la resolución del sensor. Cuando un objeto ocupa una superficie inferior a 1 mm² en la imagen no puede identificarse individualmente, sino sólo a través de la variabilidad espacial que provoca. De esta forma, en función del tamaño de los objetos se distingue:

(i) textura grosera, cuando los objetos están comprendidos entre 0,25 y 1 mm² a la escala de la imagen.

(ii) textura media, objetos comprendidos entre 0,04 y 0,25 mm², y

(iii) textura fina, objetos inferiores a 0,04 mm².

En sentido estricto, además del tamaño de los objetos que forman una determinada cubierta, la textura con la que aparece en la imagen puede variar en función de diversos factores. Los más importantes son el ángulo de observación del sensor (una observación más aguda incrementa la rugosidad), las condiciones de iluminación (a ángulos solares más bajos el efecto de sombras es más evidente), y la longitud de onda (una superficie lisa a longitudes largas puede aparecer como rugosa en cortas). Trabajando en el espectro visible e infrarrojo cercano, la rugosidad se modifica principalmente en función de las condiciones de iluminación solar. Un bosque natural, por ejemplo, ofrece una textura muy variada a lo largo del año considerando sus variadas condiciones de adquisición.

En cualquier caso, el criterio de textura es muy importante para discriminar determinadas cubiertas que pueden ofrecer un comportamiento espectral uniforme. Por ejemplo, los frutales en regadío y las caducifolias ofrecen una reflectividad muy similar, por cuanto, en muchas ocasiones, presentan grandes afinidades fisiológicas. De esta forma, el criterio de textura puede ser el único viable para distinguirlas. Los frutales ofrecen un marco de plantación regular —lo que implica menor variedad espacial en la cubierta—, mientras los árboles de hoja caduca aparecen con un desarrollo mucho más heterogéneo. En consecuencia, los frutales presentan una textura más fina, facilitando al intérprete la separación frente a especies forestales naturales (Gordon y Philipson, 1986).

La figura 5.9 recoge algunos fragmentos de la imagen TM de Madrid, mostrando diversos tipos de textura. La más grosera corresponde a las cubiertas urbanas, pues en ellas se produce la máxima diversidad espacial, al estar formadas por cubiertas de muy distinta reflectividad. Las superficies más suaves, en el extremo contrario, corresponden a los suelos descubiertos y praderas, mientras las superficies forestales ofrecen un comportamiento intermedio.

5.2.4. Contexto espacial

Por situación o contexto espacial se quiere indicar la localización de las cubiertas de interés en relación con elementos vecinos de la imagen.

Un buen ejemplo del empleo de este criterio de interpretación hace referencia, de nuevo, al mundo urbano. Un jardín situado en el interior de la ciudad y formado por especies caducifolias, tiende a presentar un tono, un color y una textura muy similares a los que puede ofrecer un bosque natural de caducifolios. La confusión se debe a que ambas cubiertas están formadas por las mismas o similares especies, incluso con densidades y heterogeneidad (textura) muy parejas. En esa situación, no cabe más criterio para separarlas que ponerlas en relación

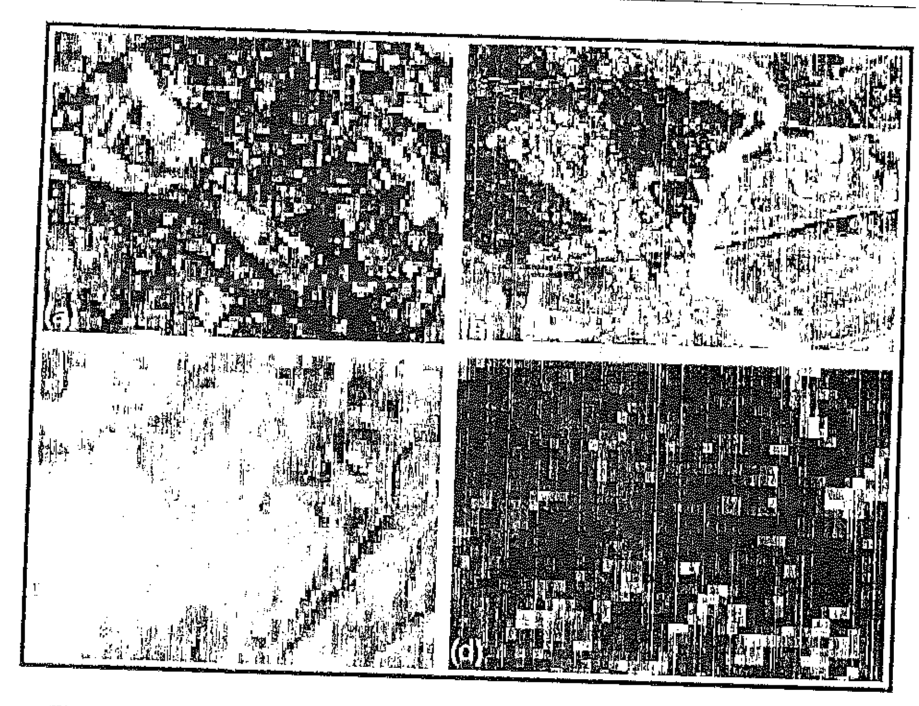


Fig. 5.9 - *Fragmentos de la imagen de Madrid mostrando distintos tipos de textura: (a) muy rugosa, correspondiente al centro de la ciudad; (b) medianamente rugosa, en el centro de la imagen aparece una zona residencial, en donde se alternan espacios construidos, jardines y vegetación natural; (c) muy lisas, correspondiente a praderas, y (d) medianamente lisa, matorral arbolado en las proximidades del monte del Pardo.*

con el entorno geográfico: aquellas que aparezcan en el interior de una superficie edificada, más o menos densa, pueden considerarse como parques urbanos, mientras las que se sitúen en un contexto de vegetación natural serán asignadas a bosques de frondosas. En similares términos cabe expresarse en lo que se refiere a la separación entre árboles de ribera y otras especies caducifolias, ya que las primeras —como su nombre indica— se asocian con cursos fluviales.

En la figura 5.10 aparece un ejemplo en donde resulta especialmente evidente el criterio del contexto espacial. Se trata de dos sectores correspondientes a cubiertas herbáceas sometidas a riego, por lo que ofrecen tonos claros en el infrarrojo cercano. Aunque las especies son similares y el tratamiento que se aplica también (ambas son regadas), su sentido temático es muy distinto, ya que una imagen alberga unos campos de golf en el Noreste de la ciudad de Madrid, y otra unos cultivos de forrajes próximos al río Jarama. Ambas cuentan con similares características espectrales, pero su emplazamiento (además de la forma) permite discriminarlas con precisión.



Fig. 5.10 - *El criterio de contexto espacial permite distin entre campos de golf (izquie y cultivos bajo riego (derech al estar los primeros ... una zona urbana y ... a un sector agrícola.*

Estas distinciones, tan importantes desde el punto de vista de la carto fía temática, son más fácilmente abordables mediante interpretación visual, ... que la clasificación digital no considera en sí el contexto geográfico, al ser complejo de definir en términos numéricos. No obstante, en posteriores capítu veremos algunas posibilidades en este sentido (cap. 7.4).

5.2.5. Período de adquisición

La mayor parte de los especialistas están de acuerdo en que la observac sistemática de la superficie terrestre es una de las principales ventajas de la t detección desde el espacio. Las características orbitales de un satélite perm que las imágenes sean adquiridas periódicamente y en condiciones ... de observación, facilitándose así cualquier estudio que requiera una dimens temporal.

Hasta el momento presente, este análisis multi-temporal se ha aborda con una doble orientación (fig. 5.11):

(i) Por un lado, con objeto de detectar cambios entre dos fechas referencia, deduciendo de ahí la evolución del medio natural o las repercusio de la acción humana sobre ese medio, y planeando, en consecuencia, las medi adecuadas para evitar su deterioro o asegurar su mejor conservación. Este en que podría denominarse multi-anual, por cuanto se utiliza el factor tiempo p seguir la evolución de una zona en un período relativamente dilatado. Más ta tendremos ocasión de profundizar en estos enfoques, dentro del capítulo dedica a técnicas de detección de cambios (cap. 7.3).

(ii) Por otro lado, podríamos hablar de un enfoque multi-... en donde la dimensión tiempo se utiliza para perfeccionar la interpretación de imagen, gracias a incorporar información sobre el ciclo estacional de las cubier vegetales. Esta dimensión resulta de gran utilidad para discriminar ... cultivos y especies forestales. El intérprete debe conocer bien el calen... estacional de estas especies, con objeto de seleccionar los períodos ... apropiados para discriminarlas, frente a otras que pueden presenta...

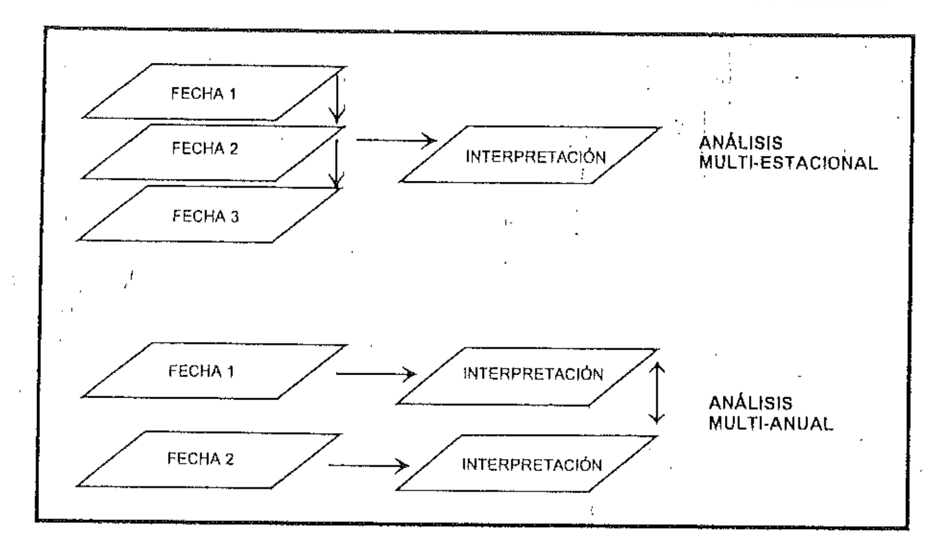


Fig. 5.11 - *Dimensiones temporales en la interpretación de imágenes*

comportamiento similar en algunos momentos del año. Algo similar ocurre cuando sólo estamos trabajando con una imagen; la fecha elegida debe ser la más idónea para conseguir separar la cubierta de interés. Por ejemplo, una cartografía de regadíos requiere trabajar con imágenes de verano, mientras un estudio geomorfológico tenderá a enfatizar las imágenes de invierno, en donde son más evidentes los lineamientos estructurales.

Independientemente del tipo de enfoque que pretenda seguirse, cualquier estudio multi-temporal implica una labor previa de corrección, con objeto de combinar adecuadamente las dos o más imágenes que van a intervenir en el análisis. Conviene tener en cuenta que los tonos/color/textura están en relación con las condiciones medio-ambientales y de adquisición, por lo que no han de considerarse en sentido absoluto; esto es, resulta recomendable aplicar esos criterios a la discriminación de cubiertas en cada imagen y no al conjunto de las diferentes fechas que intervengan en el proyecto.

Con estas salvedades, el factor multi-temporal representa un criterio de identificación muy importante en análisis visual, tanto en enfoques multi-anuales (Eyton, 1983; Crapper y Hynson, 1983; Renz, 1985), como multi-estacionales (Hilwig, 1980; Bronsveid y Luderus, 1982; Chuvieco, 1986; Chuvieco y Martínez, 1990).

Algunos estudios multi-temporales se han basado en técnicas de composición de color para realzar cambios entre dos fechas de referencia. Este es el caso de un trabajo dirigido a detectar espacios forestales sometidos a plagas de

defoliación en Canadá, en donde se aplicó cada uno de los tres colores elementales a las bandas infrarrojo cercano y rojo de las dos fechas de referencia (Hall et al., 1984).

5.2.6. Otros criterios de análisis

Los criterios arriba comentados son los más importantes para el análisis visual de la imagen. No obstante, en algún caso puede ser conveniente enriquecer la interpretación apoyándose en otros aspectos secundarios, como son los siguientes:

(i) Sombras, muy dependientes de la fecha de adquisición de la imagen y del relieve local. Permiten realzar la interpretación de los rasgos geomorfológicos, y de la textura de la imagen, especialmente en zonas forestales. Asimismo, las sombras modifican la señal recibida por el sensor de una misma cubierta, produciendo una tonalidad sensiblemente distinta. Conviene tener esto en cuenta, de cara a evitar señalar fronteras entre coberturas, allí donde sólo hay cambios en las condiciones de iluminación.

(ii) Patrón espacial. Este concepto indica una organización peculiar de los objetos que forman una determinada cubierta. Este criterio se emplea mucho en fotografía aérea (por ejemplo, para distinguir un olivar —en plantación regular— de una dehesa), pero en imágenes de satélite está bastante limitado como consecuencia de la baja resolución de los sensores disponibles. No obstante puede permitirnos identificar algunas cubiertas artificiales, como serían las plantaciones forestales (que pueden presentar en la imagen una alternancia de caminos/vegetación bastante particular), o los campos de golf, que ofrecen en el infrarrojo cercano una peculiar alternancia de sectores de alta reflectividad (las calles y *greens*) y media (la vegetación original del entorno: fig. 5.10).

(iii) Contorno - forma. Facilita el reconocimiento de algunos rasgos particulares, como es el caso de las carreteras frente al ferrocarril (de trazado menos sinuoso), o de los ríos frente a los canales artificiales, que ofrecerán un aspecto más geométrico. También permite reconocer elementos individuales en la imagen, como es el caso de complejos industriales o aeropuertos, plazas de toros, estadios de fútbol, complejos ferroviarios (fig. 5.12), y de estructuras geológicas bien definidas: volcanes, domos o lineamientos.

(iv) Visión estereoscópica. Resulta fundamental para el reconocimiento geomorfológico y de cubiertas del suelo, pues aporta una visión tridimensional del espacio observado. Como ya hemos señalado, la mayor parte de los sensores espaciales no poseen esta capacidad. Excepción a esta norma son las imágenes adquiridas por sensores fotográficos (3.3.1) y por el satélite SPOT (3.5.2). En el

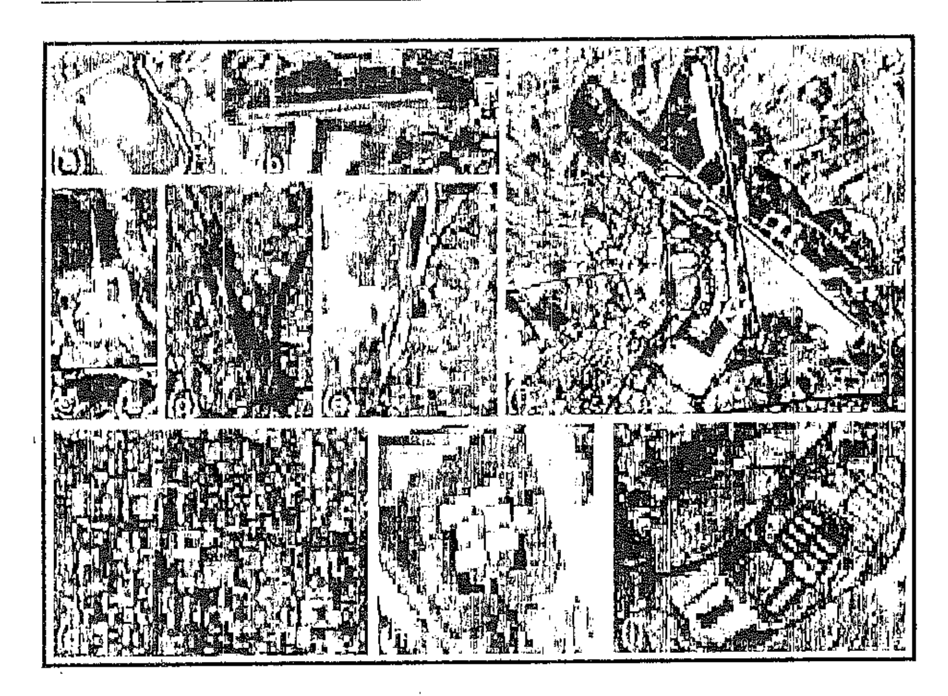


Fig. 5.12 - *Algunas formas características para reconocer objetos sobre imágenes de satélite: (a) regadío de pivote; (b y f) aeropuertos de Cuatro Vientos y Barajas; (c) hipódromo, (d y e) terminales de ferrocarril; (g) estadio de fútbol; (f, i) grandes naves: recinto ferial y Mercamadrid.*

resto, sólo puede obtenerse visión estereoscópica en las zonas de solape entre órbitas, restringiendo este criterio a una estrecha banda lateral del conjunto de la escena. Probablemente, la lista se amplíe en un futuro inmediato si pasa a un plano central la elaboración de cartografía básica a partir de sensores espaciales.

(v) Tamaño. El empleo de este criterio viene marcado por la resolución espacial de las imágenes. En aquéllas de mayor resolución pueden distinguirse objetos particulares (edificios singulares), mientras en las de menor detalle sólo pueden señalarse rangos a ciertos tipos de superficie (embalses, áreas inundadas).

Los criterios de identificación visual aquí comentados pueden agruparse en una escala jerárquica, en función de su grado de complejidad y de las variables que consideran (fig. 5.13). El tono y color serían los criterios más elementales, pues caracterizan espectralmente a una cubierta. La forma, tamaño, y textura tienen que ver con las propiedades espaciales de los objetos. La sombra y emplazamiento, con su relación a los objetos circundantes. Finalmente, la dimensión temporal hace referencia a la evolución estacional de las cubiertas.

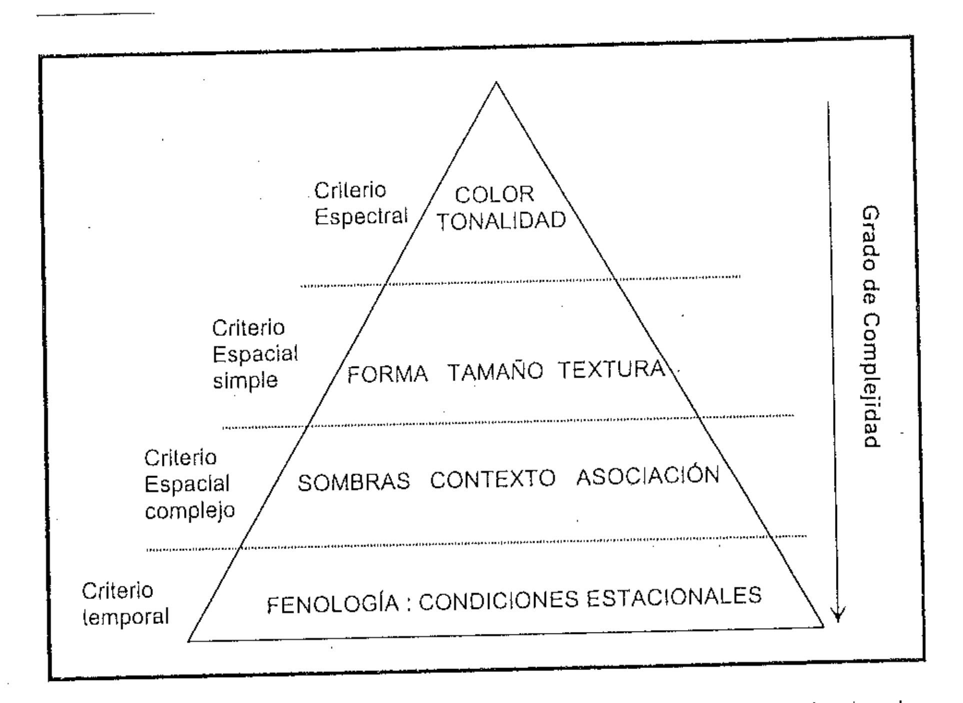


Fig. 5.13 - *Organización jerárquica de los criterios de interpretación visual (adaptado de Comunidad Europea, 1993)*

5.3. Elementos de análisis visual

Tras el repaso de los criterios sobre los que se basa la interpretación visual de imágenes, nos centramos en una serie de elementos a considerar para cualquier trabajo práctico a partir de este tipo de información.

5.3.1. Características geométricas de una imagen espacial

Aunque una imagen adquirida desde el espacio presenta menos errores geométricos que una fotografía aérea, como consecuencia de la mayor estabilidad y altura de vuelo de la plataforma, esto no quiere decir que estén libres de distorsiones, por lo que no pueden superponerse directamente sobre la cartografía básica.

Un pequeño ejercicio puede ayudar a valorar la magnitud de estos desajustes. Basta tomar un transparente y delinear los embalses y ríos que aparecen recogidos en la figura 5.4b, correspondiente a un fragmento del mapa nacional a escala 1:1.000.000. Posteriormente, puede superponerse ese transparente sobre la imagen aneja (fig. 5.4a), que recoge la misma superficie que la anterior y a similar

escala. ¿Qué errores se observan?, ¿coincide la orientación geográfica en las dos figuras?, ¿a qué puede achacarse ese desequilibrio?

Más adelante trataremos de los procesos que se aplican a la corrección de estos errores geométricos (6.5.3). Basta aquí apuntar que ese desajuste está originado por tres factores: (i) por errores, propiamente dichos, en la adquisición de la imagen; (ii) por la deformación que cualquier mapa implica de la superficie terrestre; y (iii) por errores debidos a la generalización cartográfica en el mapa elegido aquí como referencia.

No obstante estos problemas, parece claro que una imagen de satélite puede servir para actualizar aspectos planimétricos de la cartografía, sobre todo a escalas pequeñas (habitualmente menores a 1:100.000), gracias a su cobertura periódica y sistemática. Por ejemplo, en la cartografía referida, las áreas urbanas ofrecen una peor delimitación, por cuanto su dinamismo supera el ritmo de actualización de nuestra cartografía.

5.3.2. Efecto de la resolución espacial en el análisis visual

Antes se indicó que la resolución espacial hace referencia al tamaño de la mínima unidad discriminable sobre la imagen. Este concepto, en análisis visual, se relaciona tanto con el tamaño del píxel, como con la escala a la cual se representa la imagen.

La resolución espacial tiene una repercusión importante sobre la interpretabilidad de la escena. De entrada, aquellos elementos por debajo del tamaño del píxel no serán, en principio, discriminables en la imagen, lo que supone un elemento fundamental en la selección del sensor más conveniente para cada objetivo. Cuanto mayor sea la resolución, mejor podrá definirse un píxel, ya que será más susceptible de albergar una sola cubierta. Por el contrario, si el tamaño del píxel es grande, la señal detectada resulta frecuentemente de varios tipos de cubierta, haciendo mucho más compleja su identificación.

El efecto de la resolución espacial sobre la calidad final de la imagen se pone de manifiesto en el análisis de la figura 5.14. Incluye dos imágenes adquiridas por los sensores MSS y TM sobre la ciudad de Madrid. Ambas están representadas a una escala similar y corresponden a la misma región del espectro (rojo). El análisis de ambas imágenes permitirá comprobar el impacto de la resolución espacial sobre su interpretación[2]. Se sugiere realizar unos transparentes sobre la

[2] Recuérdese que el MSS ofrece una resolución espectral de 79 x 79 m, mientras la adquirida por el TM facilita un detalle espacial de 30 x 30 m.

red hidrográfica, autovías nacionales, estructura urbana, aeropuertos (Barajas, Cuatro Vientos), y grandes objetos de referencia: parques y jardines, Mercamadrid, hipódromo, Palacio Real, etc. Todos estos elementos son claramente identificables sobre la imagen TM y muy complejos sobre la obtenida por el MSS, pues todos ellos están influidos por la diferente resolución espacial que brindan estos sensores.



Fig. 5.14 - *Efectos de la resolución espacial sobre la interpretación de imágenes: en la parte superior imagen adquirida por el MSS sobre la ciudad de Madrid; en la inferior, la misma zona adquirida por el sensor TM.*

5.3.3. Efecto de la resolución espectral en el análisis visual

El carácter multi-espectral de las imágenes espaciales resulta básico de cara a su interpretación. La posibilidad de observar un fenómeno en diversas bandas del espectro amplía notablemente nuestra capacidad de reconocerlo. Como vimos anteriormente (2.5.1), cada cubierta ofrece un comportamiento espectral tipo, en función de las características de sus componentes, que denominamos signatura espectral. Allí se indicaba que ese comportamiento tipo se modifica por una serie de factores externos al sistema cubierta-sensor, estableciéndose una cierta variabilidad espectral en torno a ese comportamiento genérico.

En cualquier caso, el conocimiento de esos rasgos espectrales resulta muy interesante para proceder a una interpretación más razonada de la imagen. Un intérprete puede acostumbrarse a observar las masas vegetales con tonos oscuros en las bandas visibles y claros en el infrarrojo cercano, sin considerar los factores que inciden en ese fenómeno. No cabe duda que si éstos se tienen presentes en la interpretación de la imagen, resulta más fácil adaptarlos a zonas o categorías peor conocidas, convirtiendo la teledetección en una técnica aplicable a contextos más amplios.

No quiere esto decir que los tonos de gris sean una traducción estricta de las curvas de reflectividad previamente analizadas. Son, más bien, una traducción de los valores numéricos almacenados por el sensor —consecuencia, a su vez, de esa reflectividad—, pero no identificables con ella, ya que cuentan también los valores de calibración del sensor y los efectos atmosféricos.

En cualquier caso, puede resultar interesante hacer un pequeño ejercicio de caracterización espectral de distintas cubiertas a partir del análisis visual. El ejercicio propuesto —que se adapta de uno similar ideado por Short (1982)—, pretende que el lector complete la información incluida en la figura 5.15, a partir de los tonos de gris que observe en las distintas bandas espectrales incluidas en la figura 5.16. Se trata de las seis bandas ópticas del sensor *Thematic Mapper*, correspondientes a una adquisición realizada por el satélite Landsat-5 en julio de 1992. Recoge la mayor parte del área metropolitana de Madrid y alrededores. Con objeto de facilitar la búsqueda de espacios que definan cada uno de los tipos de cubierta, puede consultarse la cartografía disponible sobre este sector, si bien se indican, en la primera banda, algunas zonas que pueden ayudar en dicha identificación. A partir de ahí, el intérprete puede analizar los rasgos espectrales de dichas cubiertas en el resto de las bandas consideradas.

Una vez completado el gráfico, será posible responder a las siguientes preguntas: ¿es posible distinguir entre perennifolias y caducifolias?, ¿en qué bandas?, ¿qué base física tiene esa distinción?, ¿qué banda es más idónea para cartografiar los cultivos regados?, ¿por qué?, ¿se mantendría en otra fecha del año esa

separación? ¿Qué banda indica mejor las redes de transporte?, ¿es posible distinguir los límites de la ciudad?, ¿pueden discriminarse las áreas residenciales periféricas?

5.3.4. Interpretación de composiciones en color

A partir de este ejercicio y de la teoría del color previamente comentada, resultará más sencillo interpretar combinaciones multi-banda. Basta tener en cuenta que el proceso aditivo implica que los píxeles tendrán tanto más intensidad de un

1. Monte del Pardo (Encinar)

Tono	B1	B2	B3	B4	B5	B6
Muy claro						
Claro						
Oscuro						
Muy Oscuro						

2. Parque del Retiro (Caducifolios)

Tono	B1	B2	B3	B4	B5	B6
Muy claro						
Claro						
Oscuro						
Muy Oscuro						

3. Vallecas (Pastizal)

Tono	B1	B2	B3	B4	B5	B6
Muy claro						
Claro						
Oscuro						
Muy Oscuro						

4. Belvis del Jarama (Regadío)

Tono	B1	B2	B3	B4	B5	B6
Muy claro						
Claro						
Oscuro						
Muy Oscuro						

5. Madrid (Áreas urbanas densas)

Tono	B1	B2	B3	B4	B5	B6
Muy claro						
Claro						
Oscuro						
Muy Oscuro						

6. Somosaguas (Áreas urbanas ajardinadas)

Tono	B1	B2	B3	B4	B5	B6
Muy claro						
Claro						
Oscuro						
Muy Oscuro						

7. Vicálvaro (Suelos descubiertos)

Tono	B1	B2	B3	B4	B5	B6
Muy claro						
Claro						
Oscuro						
Muy Oscuro						

8. Estanque Casa de Campo (Agua)

Tono	B1	B2	B3	B4	B5	B6
Muy claro						
Claro						
Oscuro						
Muy Oscuro						

Fig. 5.15 - *Construcción de curvas espectrales cualitativas*



Fig. 5.16a - *Efecto de la resolución espectral en la interpretación de imágenes: imagen Landsat-TM de la ciudad de Madrid: Banda 1*



Fig. 5.16b - *Misma imagen: Banda 2*



Fig. 5.16c - *Misma imagen: Banda 3*



Fig. 5.16d - *Misma imagen: Banda 4*

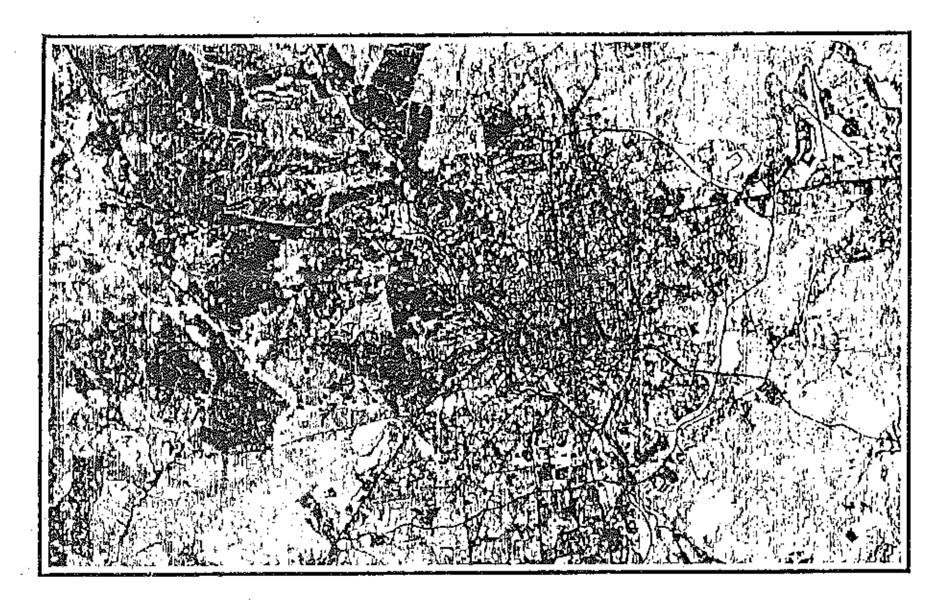


Fig. 5.16e - *Misma imagen: Banda 5*

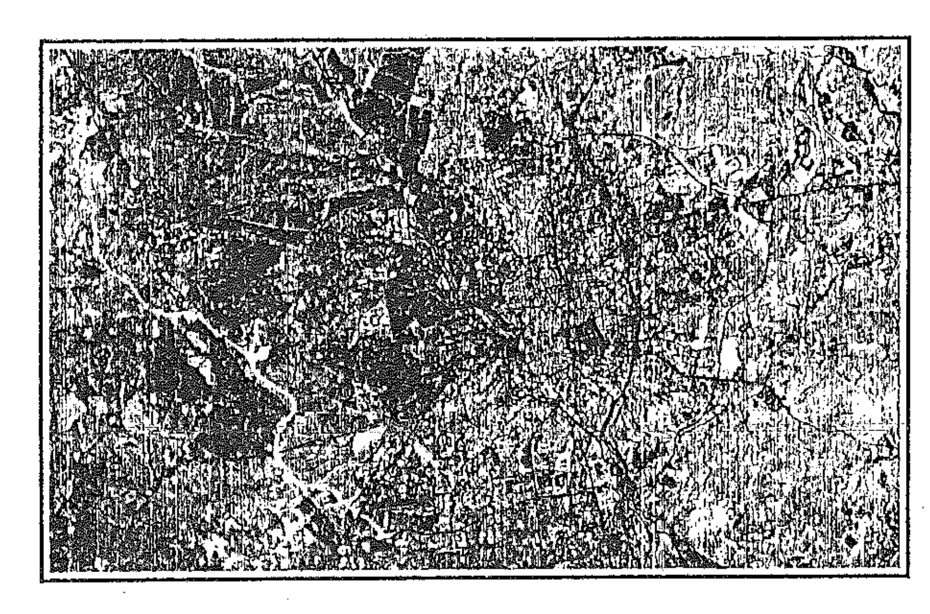


Fig. 5.16f - *Misma imagen: Banda 7*

determinado color cuanto más blancos aparezcan en la banda a la que se aplique ese color. Si optamos, por ejemplo, por una composición en falso color (IRC,R,V), un píxel aparecerá rojo cuanto mayor intensidad presente en el IRC y menor en las dos restantes. Éste es el caso de las zonas cubiertas por vegetación vigorosa, que ofrecen un tono claro en el IRC, oscuro en el R y medio en el V, por lo que tienden a teñirse con un color rojo o rojo-magenta. Por el contrario, una lámina de agua, que aparece oscura en la banda espectral V y negra en las restantes, tenderá a mostrar un azul oscuro, ya que cuenta con un débil componente de azul y casi nulo de verde y rojo.

Siguiendo este razonamiento, el lector puede contestar a las siguientes preguntas: ¿en qué color aparecerán los perennifolios y las zonas urbanas?, ¿qué combinación de color se requiere para que la vegetación aparezca en verde (consultar figura 5.15)? En esa nueva combinación, ¿cómo aparecerían las zonas urbanas, el agua y los perennifolios?, ¿qué asignación de colores complementarios se requeriría para lograr las mismas tonalidades?

La imagen correspondiente a la figura 5.17* puede servir para familiarizar al lector con este tipo de composiciones coloreadas. Se trata de una composición en falso color correspondiente a un cuarto de escena de una imagen TM, adquirida en agosto de 1984. Se localiza en el cuadrante Nororiental de la Comunidad Autónoma de Madrid y Occidental de Guadalajara. El importante contraste topográfico y la presencia de una gran ciudad como Madrid, conlleva una notable variedad de tipos de ocupación del suelo. En consecuencia, resulta idónea para realizar algunas reflexiones que ilustren sobre los criterios de interpretación arriba indicados. Para los lectores no familiarizados con el área de estudio, puede ser conveniente acudir a una cartografía de apoyo a media escala, con objeto de situar los rasgos geográficos relevantes: embalses, ciudades más destacadas, unidades geomorfológicas, etc. Tras ello, pueden abordarse los siguientes ejercicios:

(i) Identificar tono y textura de las siguientes cubiertas: cultivos herbáceos de secano, cultivos leñosos de secano, cultivos de regadío, perennifolias, caducifolias, áreas residenciales, zonas urbanas densas, agua.

(ii) Con ayuda de un transparente, recorrer cada una de las carreteras principales de la imagen. Anotar qué tipo de coberturas atraviesan desde su salida de la ciudad.

(iii) Delimitar todos los parques y jardines reconocibles sobre la imagen. ¿En qué sectores de la ciudad son más dominantes? Comentar su localización en relación con la actividad industrial y residencial de la ciudad.

(iv) Localizar las principales áreas de segunda residencia que aparecen en la imagen. Ponerlas en relación con la vegetación próxima, morfología, accesibilidad y clima. ¿Cuál de estos factores es dominante?

(v) ¿Puede establecerse una gradación de tipos de vegetación en función de la altitud? ¿qué tipo de especies aparecen en: -pie de monte, -escalón inferior, -escalón superior, -cumbre. ¿Pueden detectarse estas gradaciones sobre la imagen?, ¿por qué?

5.3.5. Ejercicios de análisis multi-temporal

Ya hemos comentado que el factor temporal puede abordarse con un doble objetivo: por un lado, reconstruir la variación estacional de la zona; por otro, la detección de cambios.

El primer aspecto supone utilizar la dimensión temporal para mejorar la interpretación de la imagen, al aportar un valioso informe sobre el desarrollo fenológico de las especies vegetales. El interés de utilizar este criterio puede quedar de manifiesto tras el análisis comparativo de las figuras 5.17* y 5.18*, que corresponden a dos adquisiciones TM de los meses de agosto y mayo. Por comparación de ambas figuras se observará el dinamismo estacional de algunas cubiertas vegetales, principalmente de los cultivos herbáceos, que muestran un claro vigor vegetal en la imagen de mayo, mientras se presentan como suelo descubierto en la de agosto. En similares términos cabe expresarse respecto a los pastizales de pie de monte, situados al noroeste de la ciudad de Madrid, que ofrecen tonos rojos en mayo frente a los ocres de la imagen de verano.

Un seguimiento estacional más completo se recoge en la figura 5.19, que presenta cuatro imágenes del sensor MSS correspondientes a distintas estaciones del año. Se recoge la misma superficie a la imagen ya comentada en la figura 5.4, un sector de unos 25.000 km² correspondiente a la región centro, al Suroeste de Madrid. Con esta secuencia temporal, se pretende mostrar el dinamismo estacional de las principales cubiertas, por comparación de los tonos de gris que ofrecen las cuatro imágenes. Para facilitar esta comparación, todas las imágenes se refieren a la misma banda del espectro, concretamente al infrarrojo cercano (Banda 7 en el MSS del Landsat-2).

Por comparación entre las cuatro imágenes, puede obtenerse una valiosa experiencia para futuros trabajos que requieran hacer uso de la dimensión temporal. Entre los múltiples aspectos que pueden considerarse en este tipo de estudios multiestacionales, la secuencia de imágenes que se presenta permite abordar los siguientes aspectos: (i) el seguimiento de la cobertura de nieve; (ii) el estado de ríos y embalses; (iii) la mejor interpretación de aspectos geomorfológicos (lineamientos, divisorias de aguas); (iv) estado de los cultivos; (v) dinámica de la vegetación natural.

En lo que se refiere al seguimiento de la cobertura de nieve, puede realizarse una cartografía diacrónica, comparando su extensión a lo largo del año.

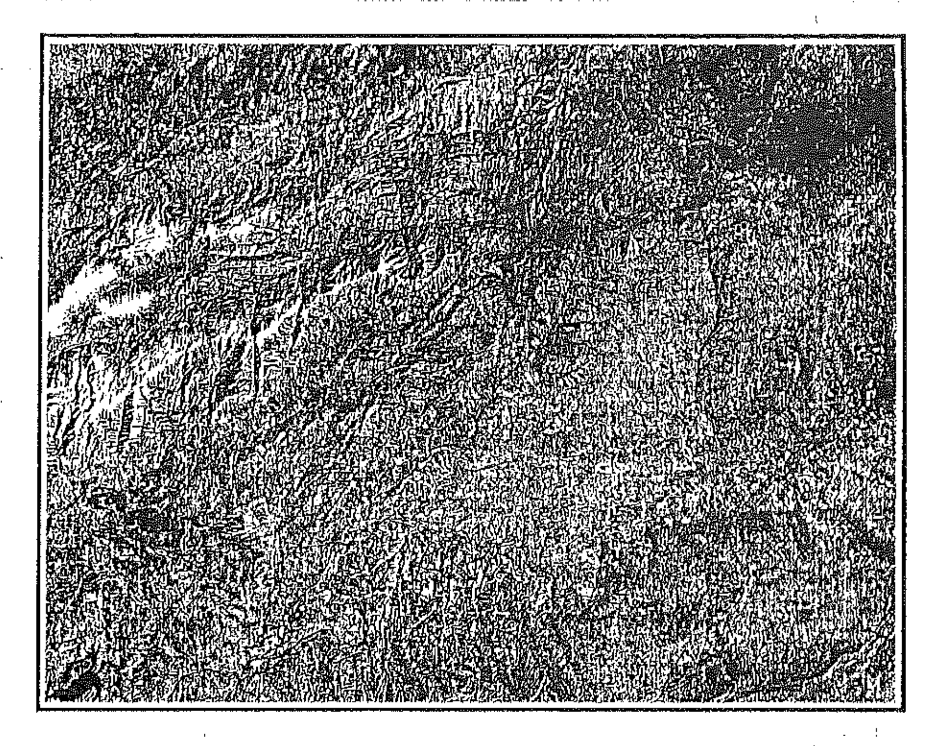


Fig. 5.19a - *Dimensión multi-estacional en la interpretación de imágenes: adquisición de enero*

A la vez, y en función del estado de la capa de nieve, pueden distinguirse distintos tipos de embalses, con una dinámica peculiar de acuerdo a su carácter. Por ejemplo, el embalse del Rosarito, al pie de la Sierra de Gredos, presenta un mínimo mucho más marcado en octubre que en mayo, frente a otros de régimen pluvial, como el de Cazalegas, que no presenta un contraste tan nítido.

En cuanto a la dinámica de los cultivos, la comparación entre las distintas estaciones permite diferenciar los cultivos regados de los secanos. De igual forma, puede observarse la evolución de la vegetación natural en las distintas estaciones, particularmente en las especies de hoja caduca, y en los prados naturales.

El segundo enfoque del análisis multi-temporal se dirige a detectar cambios entre dos fechas alejadas en el tiempo, estudiando el dinamismo temporal de una determinada zona: espacios urbanos, áreas de agricultura intensiva, comarcas sujetas a ordenación, etc. También nos permite evaluar la superficie afectada por fenómenos efímeros, como es el caso de inundaciones o erupciones volcánicas, así como seguir la evolución de sus efectos.

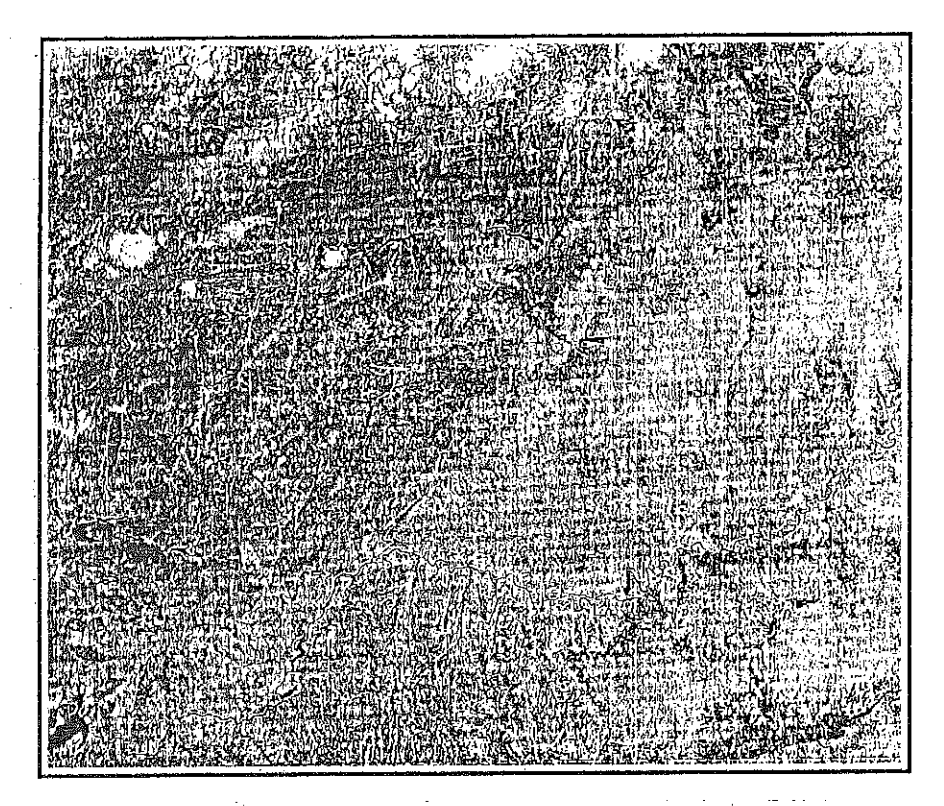


Fig. 5.19b - *Dimensión multi-estacional en la interpretación de imágenes: adquisición de mayo*

Como muestra de las posibilidades de este enfoque del análisis multitemporal se presenta la figura 5.20. Incluye dos imágenes adquiridas por el sensor Landsat-TM, con ocho años de diferencia (1984 y 1992). La resolución espacial y espectral es la misma, por lo que podemos emplear esta información para delimitar los principales cambios producidos en el área metropolitana de Madrid entre las dos fechas de referencia. Los cambios más evidentes son la construcción son la construcción de la M-40, autovía de circunvalación exterior de la ciudad, y la apertura del recinto ferial de Madrid, situado entre la M-40 y el aeropuerto de Barajas. La M-40 se observa en color oscuro en el trazado comprendido entre la N-IV y la N-I, al Este de Madrid, mientras aparece en color claro hacia el Oeste, ya que en esa fecha aún no se encontraba pavimentada. Respecto al recinto ferial, se distinguen nítidamente los pabellones de exposición (por su gran tamaño y tono destacan de las construcciones vecinas) y el estanque artificial del parque Juan Carlos I. También se delimitan perfectamente las nuevas áreas residenciales de Valdebernardo (en el borde oriental de la M-40, muy cerca de su confluencia con la N-III), y Somosaguas (al Oeste de la Casa de Campo), y la consolidación de otras zonas, en este mismo sector, que aparecían en construcción en 1984.

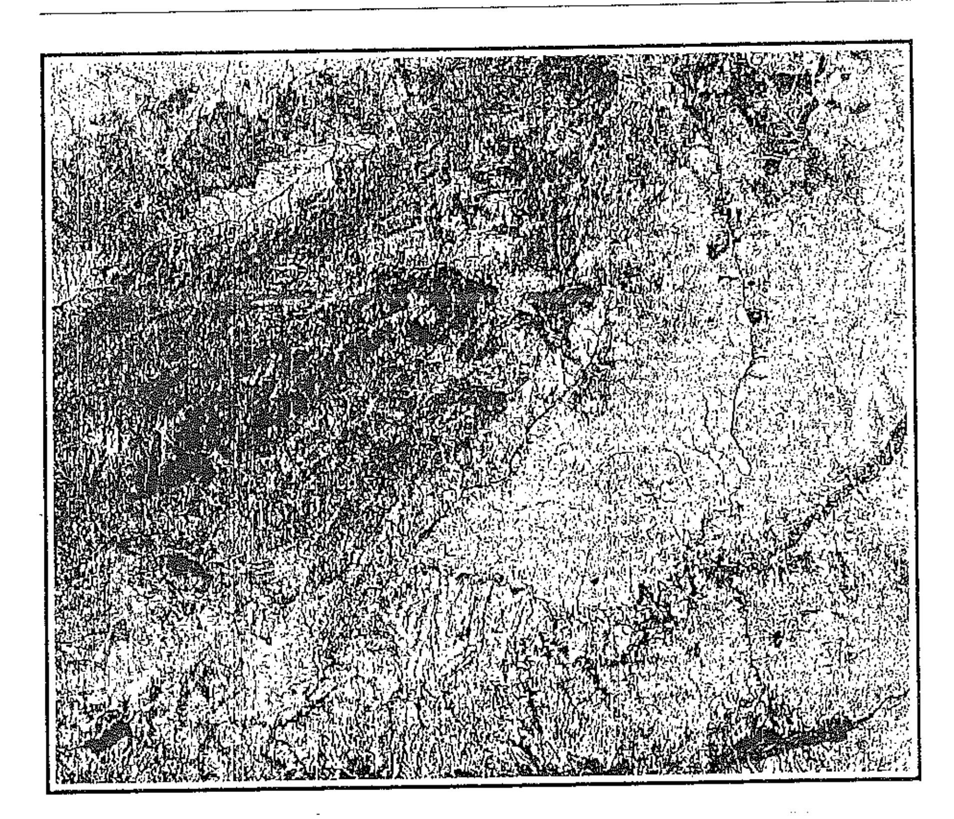


Fig. 5.19c - *Dimensión multi-estacional en la interpretación de imágenes: adquisición de julio*

5.4. Algunos ejemplos de análisis visual

Esta obra no se ha concebido para comentar las múltiples aplicaciones de la teledetección, sino sólo para presentar sus fundamentos. Pese a ello, presentamos algunos ejemplos de análisis visual, a modo de ejercicios, para que el lector compruebe las posibilidades de este tipo de interpretación.

5.4.1. Cartografía geológica

A partir de imágenes espaciales, pueden detectarse rasgos geológicos de gran radio de cobertura. Un buen ejemplo sería el descubrimiento del abombamiento transversal del bloque meseteño, determinado por Alía y colaboradores a partir del análisis visual de las primeras imágenes Landsat disponibles en nuestro país (Alía et al., 1976). Junto a estos fenómenos de conjunto, merecen destacarse otros aspectos más parciales, como son la cartografía de lineamientos, el estudio de erupciones volcánicas, la localización de acuíferos o de yacimientos minerales, y el seguimiento de la dinámica fluvial.

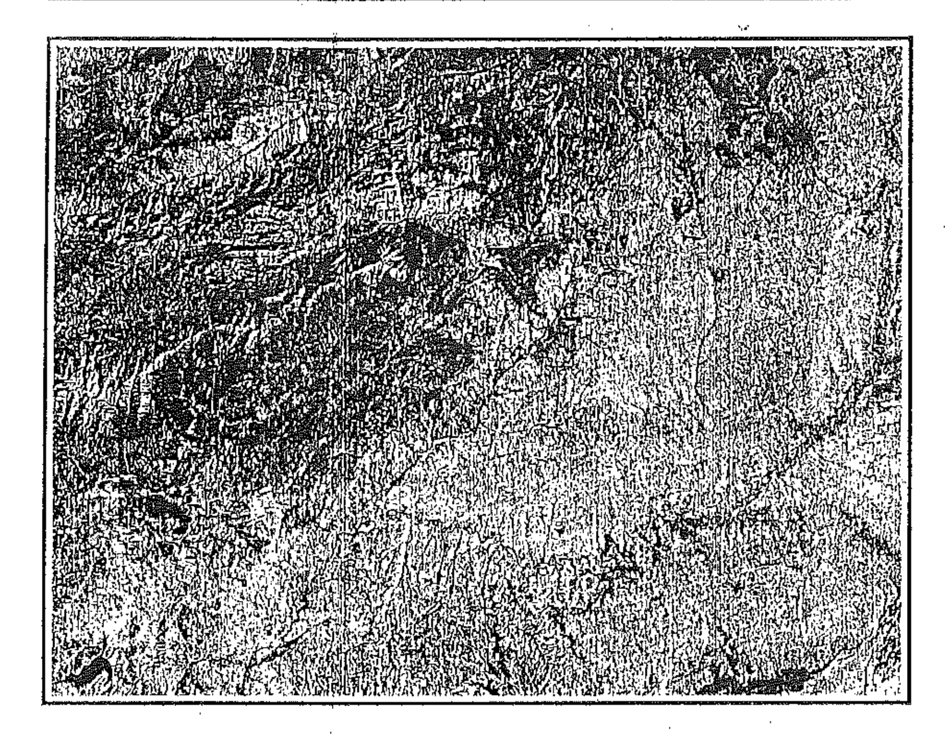


Fig. 5.19d - *Dimensión multi-estacional en la interpretación de imágenes: adquisición de octubre*

De estos aspectos, la cartografía de alineaciones ha sido el más profusamente empleado en análisis visual. Por alineación o lineamiento se entiende cualquier «rasgo lineal, simple o compuesto, de una superficie, que difiere claramente de los rasgos adyacentes y previsiblemente refleja fenómenos del subsuelo» (Moore y Waltz, 1983). Estos rasgos pueden reconocerse visualmente, a partir de la imagen original o, mejor aún, tras aplicarle alguna técnica de realce (6.6.6). Una vez reconocidos, pueden realizarse gráficos de frecuencia, indicando las direcciones dominantes, lo que nos permite ponerlos en relación con la estructura geológica de la zona.

Tomemos, como ejemplo, las cuatro imágenes que incluye la figura 5.16. A partir de ellas pueden dibujarse, con ayuda de un transparente, todos los lineamientos reconocibles sobre la imagen (fig. 5.21). Las direcciones dominantes están claramente relacionadas con la tectónica general de la zona[3].

[3] Puede consultarse como referencia el Mapa Geológico Nacional a escala 1:1.000.000, así como la serie geológica de mayor escala (1:200.000 y 1:50.000). Entre la bibliografía de referencia, basta acudir a Terán, Solé y otros: *Geografía General de España*, Ariel, Barcelona (varias ediciones).

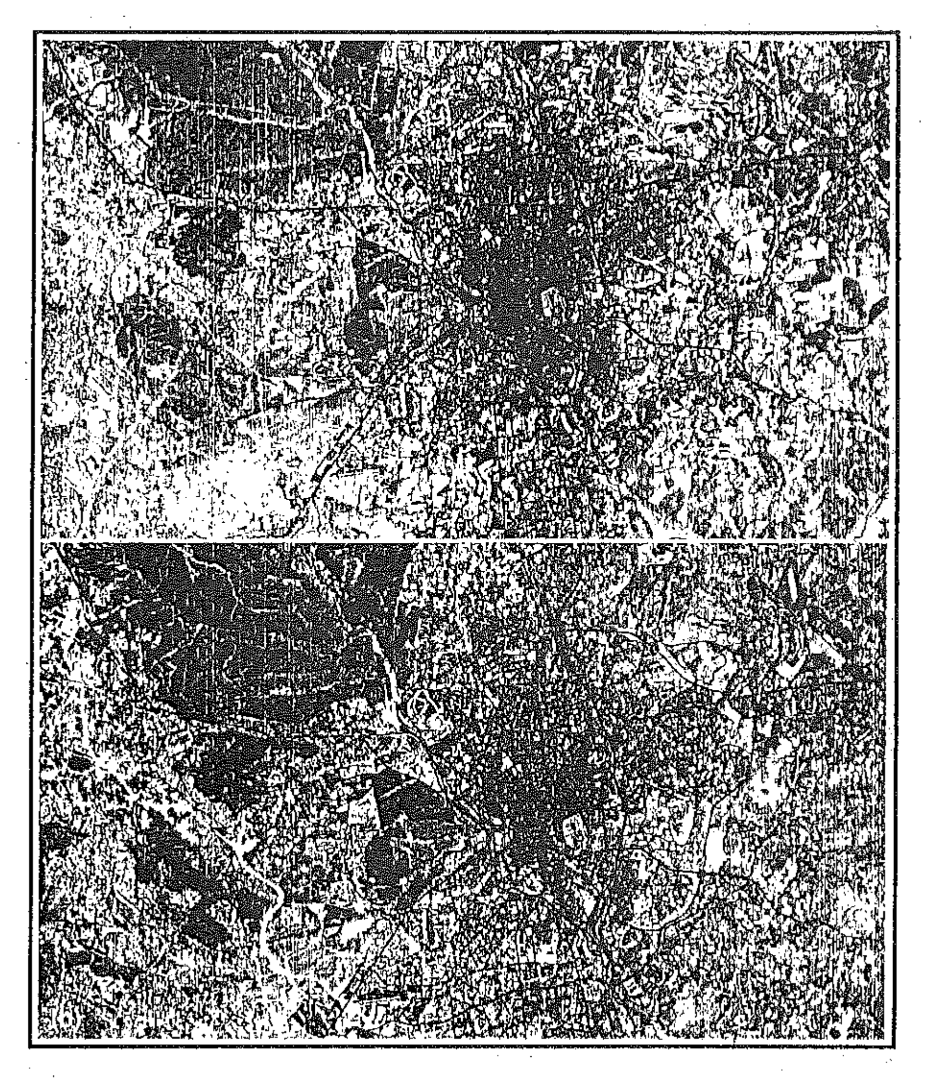


Fig. 5.20 - *Detección de cambios por análisis visual: imágenes TM adquiridas en 1984 (superior) y 1992 (inferior) sobre la ciudad de Madrid*

Este ejercicio pasa por reflexionar, en primer lugar, sobre la estación y banda espectral más idónea para este tipo de cartografía. A partir del examen de esas cuatro imágenes, puede apreciarse como el otoño e invierno resultan más adecuadas, puesto que el efecto de sombreado realza notablemente cualquier contraste topográfico.

Respecto a la banda del espectro, se recomienda utilizar la correspondiente al infrarrojo cercano (banda 7 en el sensor MSS), pues los lineamientos

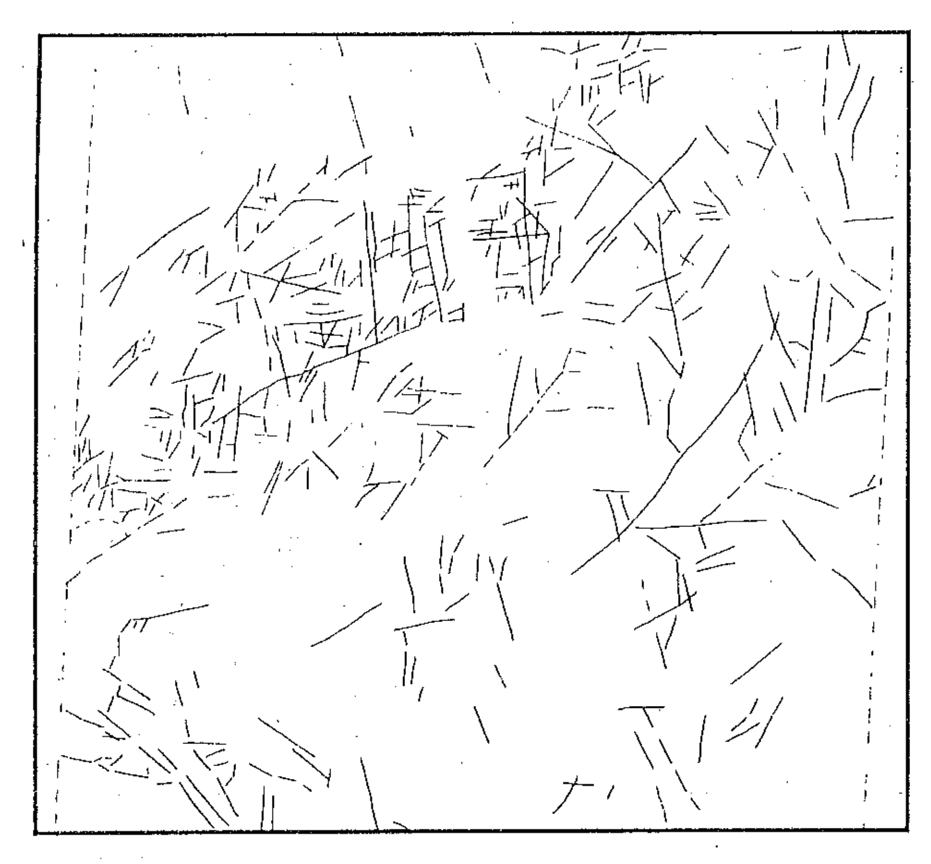


Fig. 5.21 - *Mapa de lineamientos a partir del análisis visual de imágenes*

suelen asociarse con concentraciones de humedad, nítidamente visibles en esta región del espectro. Similares trabajos se han planteado por otros autores, tanto sobre imágenes Landsat (Short, 1982, pp. 118-131; Alía et al., 1976), como sobre imágenes radar (Woldai, 1983; Calvet y Pascual, 1987).

5.4.2. Cobertura del suelo

Este término engloba un amplio rango de aplicaciones. Por cobertura del suelo entendemos el tipo de ocupación existente sobre él, ya sea ésta vegetación natural, cultivos agrícolas o espacios urbanos. Este tipo de cartografía resulta básica en la planificación del territorio, ya que es preciso conocer la dedicación actual del terreno para proponer cualquier mejora. Con las ideas vistas previamente (4.2.1), conviene organizar una leyenda coherente, a la zona y al propósito del estudio, que guíe los trabajos de interpretación visual.

Con estas ideas, el lector interesado puede ensayar una cartografía de la ocupación del suelo a partir de las imágenes en falso color que aparecen en las figuras 5.17* y 5.18*. Con ayuda de unos transparentes, se trata de ir delimitando manchas de color homogéneas, que luego pueden identificarse sobre cartografía de apoyo[4], fotografía aérea o trabajos de campo. Sería recomendable, al menos, discriminar las siguientes categorías: perennifolios, caducifolios, matorral, pastizales, zona urbana densa, zona urbana laxa, cultivos regados, cultivos de secano y láminas de agua.

El análisis visual se ha empleado en numerosos trabajos de cartografía temática. Las áreas más desarrolladas han sido la cartografía de especies forestales (Marx y Hildebrandt, 1978; Morain y Klankamsorn, 1978; Sadar et al., 1982), la estratificación fisiográfica (Hilwig, 1980; Astaras y Silleos, 1984; Nikolaus, 1988), y propiamente la cartografía de ocupación del suelo (Chicharro, 1978; Harnapp, 1978; Chuvieco, 1986; Martínez, 1989). Por su alcance europeo, merece especial atención en este sentido, la cartografía de ocupación del suelo de los países miembros de la Unión europea a escala 1:100,000 (proyecto *CORINE-Land Cover*), realizada a partir del análisis visual de imágenes Landsat y SPOT (López-Vizoso, 1989; Comunidad Europea, 1993).

Un ejemplo de la variedad de criterios visuales que incluye la discriminación de las cubiertas del suelo puede seguirse en un trabajo de este tipo desarrollado sobre la zona centro (Chuvieco y Martínez, 1990). Para este caso, se emplearon en la interpretación los siguientes elementos: tono, color, textura, emplazamiento y alternancia estacional. El trabajo pretendía realizar una cartografía de la cobertura del suelo a escala 1:250.000 sobre las dos imágenes TM, de mayo y agosto, comentadas previamente. En el ensayo cartográfico se delimitaron catorce categorías: espacios urbanos densos, áreas residenciales, parques urbanos, herbáceos de secano, olivar-viñedo, cultivos de regadío, suelos no cultivados, bosques de caducifolias y de perennifolias, praderas, pastos y matorrales, superficie improductiva y agua. Algunas de estas categorías fueron claramente discriminables a partir de su coloración en la imagen de agosto, utilizada como referencia. Se trató del agua, bosques de perennifolios y matorral. Otras se delinearon tras comparar esta imagen con la de mayo: suelos no cultivados, zona urbana densa, praderas, olivar-viñedo. El resto, exigieron una conjunción de diversos criterios. Éstas fueron: caducifolios, cultivos regados, urbanizaciones residenciales y parques urbanos. En este punto, se puso en evidencia el interés de contar con otros criterios visuales de identificación (fig. 5.22). La textura permitió aislar las áreas residenciales, mucho más heterogéneas que el resto de las arriba

[4] Por ejemplo, el *Mapa de Formaciones Vegetales y Usos Actuales del Suelo de Madrid*, de la Comunidad de Madrid, o el *Mapa Provincial de Cultivos y Aprovechamientos*, del Ministerio de Agricultura. Ambos están editados a escala 1:200.000.

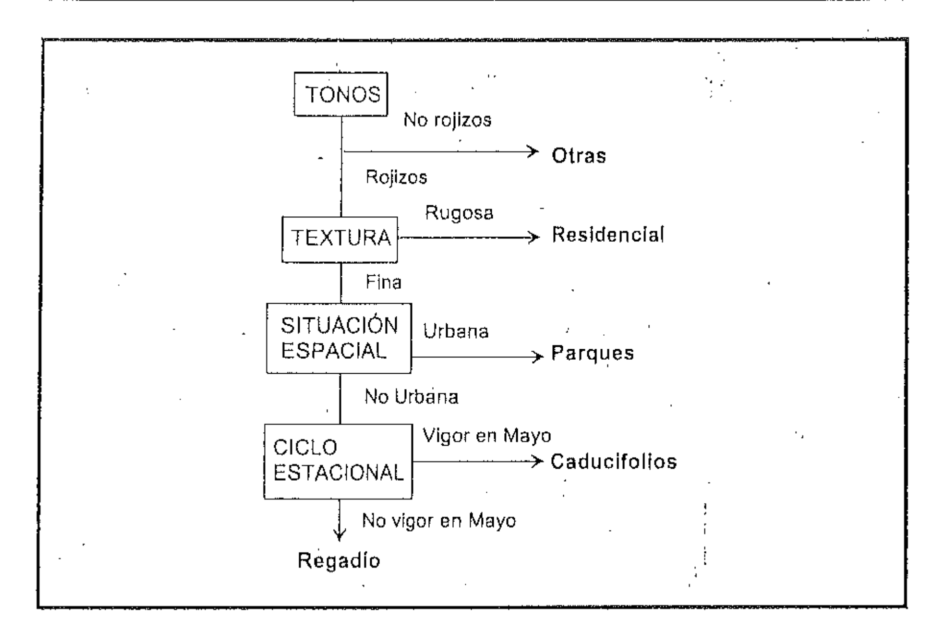


Fig. 5.22 - *Un ejemplo de clave jerárquica para organizar criterios visuales en la interpretación de imágenes (tomado de Chuvieco y Martínez, 1990)*

indicadas. El contexto espacial permitió separar los parques urbanos, claramente identificables por su situación. Por último, la dimensión estacional facilitó la discriminación de los cultivos regados frente a los caducifolios, ya presentes en el suelo en la imagen de mayo.

5.4.3. Morfología urbana

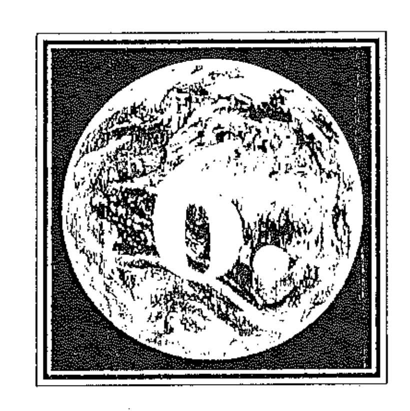
Teniendo en cuenta la gran complejidad espacial del fenómeno urbano, en donde conviven actividades muy variadas sobre un reducido espacio, la aplicación de la teledetección espacial a estos ámbitos es reciente y aún limitada. El principal problema radica en la resolución espacial de los sensores espaciales, excesivamente groseros para aportar nueva información sobre el entramado urbano (Welch, 1982).

Pese a esto, contamos con algunos estudios de aplicación que permiten mejorar nuestra información sobre áreas remotas, en donde la cartografía disponible es inadecuada. Trabajos de este tipo son los emprendidos sobre Nigeria (Olorunfemi, 1987; Adeniyi, 1987) o China (Lo y Welch, 1977). Incluso en países más desarrollados, la cartografía de zonas urbanas ofrece importantes problemas de actualización, debido al dinamismo que normalmente presentan. La cobertura temporal de las imágenes espaciales estimula su empleo en tareas de actualización,

ya sea de los límites censales (Dietrich y Lachowski, 1978), ya del espacio edificado (Carter y Stow, 1979; Welch, 1980; Molina y Chuvieco, 1995). A partir de imágenes TM o SPOT, esta aplicación puede resultar cada vez más viable. Baste, como ejemplo, comparar las imágenes incluidas en la figura 5.20 con un mapa provincial de escala pareja (1:200.000). La comparación entre ambos documentos permite delimitar áreas de desarrollo urbano no incluidas en la cartografía convencional —necesariamente menos dinámica que la imagen de satélite—, mostrando una información global y actualizada del tejido urbano.

Un poco más refinado resultaría el análisis de la imagen para inferir rasgos de la morfología urbana. Los criterios empleados, en este caso, serían el tono, color y la textura. A partir del primero puede deducirse la densidad de edificación, por cuanto aquellas zonas que alberguen menor influencia del trazado viario ofrecerán un tinte más oscuro. Asimismo, el tono indica si la zona cuenta o no con espacios verdes, bien sea continuos (manchas uniformes), bien discontinuos (tinte rojo salpicado en medio de los azules propios de la edificación). En cuanto a la textura, indica el grado de mezcolanza propio de un determinado sector. A partir de estos dos criterios, puede ensayarse una delimitación de sectores morfológicos dentro de la ciudad de Madrid (fig. 5.23*). Sería conveniente distinguir los siguientes sectores: centro histórico, ensanche (barrio de Salamanca), barrios de expansión no planificada (eje de Bravo Murillo), barrios residenciales (el Viso, Hispano América, Nueva España). De igual forma, pueden identificarse ejes viarios y espacios verdes continuos, y, en función de su anchura y tamaño, aportar más datos a esa caracterización morfológica.

Ejercicios similares a éste se han desarrollado con un contexto docente (Chuvieco y Sancho, 1986; Casas y Chuvieco, 1987; Sancho y Chuvieco, 1992).



Tratamiento Digital de Imágenes: I. Correcciones y Realces

*«Abrir el corazón a todos
es renunciar a la propia casa.»*

[Juan Antonio Cebrián, *Billete de Ida y Vuelta*]

6.1. La matriz de datos en una imagen digital

Como se comentó previamente (3.3.2), el proceso de adquisición de una imagen digital difiere, sustancialmente, del empleado en la fotografía aérea. Como es sabido, en cualquier sistema fotográfico, la energía procedente de los objetos se registra sobre una superficie sensible a la luz. Esta puede componerse de una o varias capas, formando, respectivamente, una película pancromática o en color.

En el caso de los equipos óptico-electrónicos, no existe esta superficie sólida de grabación. El sensor explora secuencialmente la superficie terrestre, adquiriendo —a intervalos regulares— la radiación que proviene de los objetos sobre ella situados. La radiancia recibida estará en función de las características de la parcela del terreno que observa el sensor en cada instante, y el tamaño de ésta, será una función de la resolución espacial del sensor. Cada una de estas parcelas, que constituyen la unidad mínima de información en la imagen, se denomina píxel (del inglés *picture element*, elemento pictórico). En términos sencillos, podemos identificar un píxel como cada uno de los pequeños cuadrados que forman una imagen (figura 6.1). El color con el que aparece cada píxel en el monitor se define por un valor numérico, que codifica digitalmente la radiancia detectada por el sensor para esa parcela del terreno y esa banda espectral. Este valor numérico se denominará, a partir de aquí, **Nivel Digital** (ND). El nombre se justifica por tratarse de un valor numérico, no visual, pero que puede fácilmente traducirse a una intensidad visual o, si se prefiere, a un nivel de gris, mediante cualquier convertidor digital-analógico (un monitor de visualización, por ejemplo). Cuando se visualiza un píxel, habitualmente la intensidad de color con la que aparece en el monitor depende de su ND almacenado en el disco, aunque no tienen por qué ser iguales, como veremos más adelante (cap. 6.6). En ese sentido, conviene distinguir el ND de cada píxel y su nivel visual (NV) que corresponde a la intensidad de color con que se visualiza ese píxel en el monitor. Normalmente, los NV

46	50	50	43	39	36	46	39	43
39	32	25	21	10	18	36	18	18
39	33	36	33	27	27	36	30	33
30	15	15	12	7	6	13	14	14
12	10	11	6	6	8	11	9	7

Fig. 6.1 - *Un imagen digital está formada por valores numéricos que definen el tono o nivel de gris de cada unidad pictórica, denominada píxel (adaptado de Lillesand y Kiefer, 1994)*

son efímeros, ya que sólo se utilizan para operaciones de realce e interpretación visual de la imagen, mientras los ND forman la base para las operaciones de interpretación digital, especialmente cuando se intenta relacionar la información adquirida por el sensor con algún parámetro físico (reflectividad o temperatura: cap. 7.1).

El ND se conoce con distintos nombres en la bibliografía anglosajona: *Digital Number* (Lillesand y Kiefer, 1994), *Pixel Value* (Mather, 1987; Hord, 1986), *Brightness Value* (Jensen, 1996), *Grey Level* (Schowengerdt, 1983), o *Digital Count* (Richards, 1993). En nuestro idioma, nos parece más apropiado el término ND para expresar su significado, por cuanto se trata de un valor (digital) con un claro contenido pictórico (nivel de gris). En resumen, la unidad mínima de información en una imagen digital se denomina **píxel**, definido por un número entero, **ND**, que puede convertirse en una intensidad luminosa o nivel de gris.

Teniendo presente estas ideas, la organización de los datos en una imagen digital puede esquematizarse en la figura 6.2. Como vemos, se trata de una matriz numérica de tres dimensiones. Las dos primeras corresponden a las coordenadas geográficas de la imagen, mientras la tercera indica su dimensión espectral. La orientación aproximada Norte-Sur se obtiene variando las filas de la matriz, que normalmente reciben el nombre de líneas (*row, line*), mientras el recorrido en el sentido de las columnas (*column*) indica la disposición Oeste-Este de la imagen.

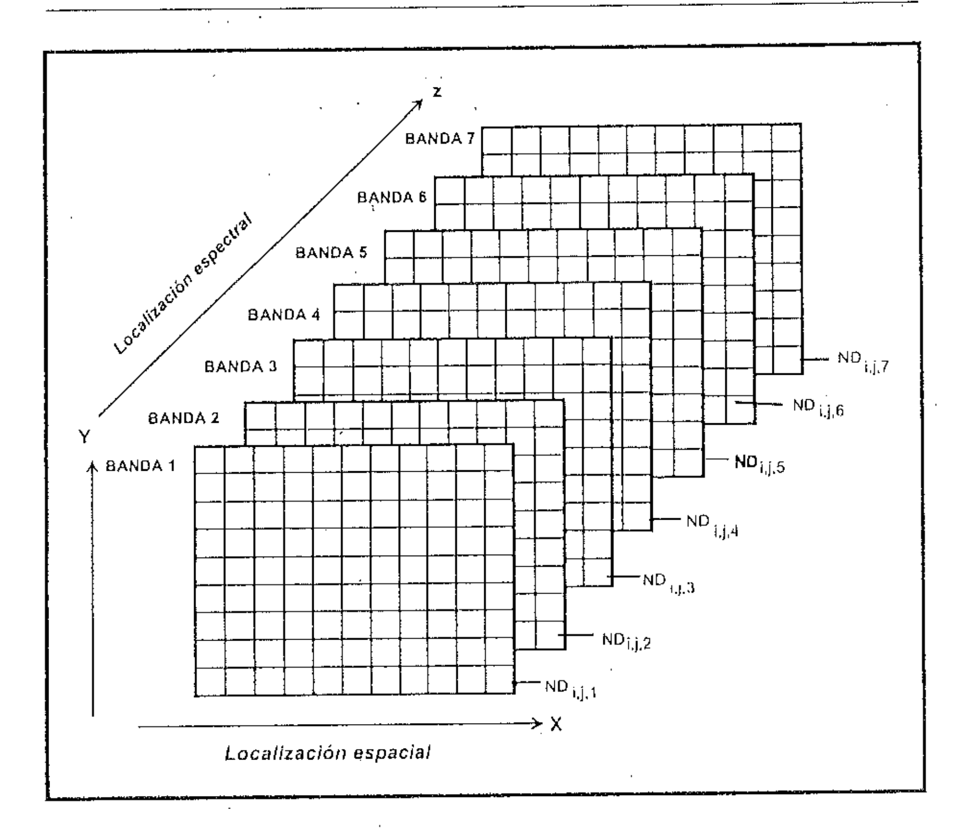


Fig. 6.2 - *Organización de datos en una imagen digital*

En esta matriz, el origen de coordenadas se sitúa en la esquina superior-izquierda (línea 1, columna 1), en lugar del borde inferior-izquierdo, como ocurre en cualquier eje cartesiano. Esto es debido a la secuencia de adquisición de imágenes, de Norte a Sur, de acuerdo a la traza del satélite. La tercera dimensión corresponde a la resolución espectral del sensor. Hay tantos planos en la imagen como bandas originalmente detectadas: 36 para el MODIS, 7 para el TM, 5 para el AVHRR, 4 para el MSS ó 3 para el HRV.

Teniendo presente ese carácter matricial de cualquier imagen numérica, son más fácilmente comprensibles las posteriores transformaciones aplicadas sobre ella. Éstas son, en muchos casos, operaciones estadísticas comunes a otras matrices numéricas. Por ejemplo, en una imagen digital podemos calcular medidas de tendencia central y dispersión (media y desviación típica en cada una de las bandas), cambiar su orientación geométrica (rotación de la matriz), realizar combinaciones aritméticas entre bandas (p.ej., cocientes), sintetizar varias bandas reduciendo la información redundante (componentes principales), o discriminar grupos de ND homogéneos dentro de la matriz (clasificación).

Como es lógico, el tratamiento digital de imágenes se apoya en equipos informáticos adaptados a esta aplicación. Por ello, se inicia este capítulo con un repaso de las características y componentes de este tipo de equipos, que van a marcar el rango de posibilidades que se abra, en última instancia, al usuario. Además, se ha introducido un epígrafe previo, dedicado a la estructura de almacenamiento de datos en estas imágenes, con objeto de introducir al lector en el trabajo con este tipo de información numérica.

6.2. Soporte y organización de la imagen

Cualquier tratamiento digital aplicado a las imágenes, requiere que previamente éstas sean introducidas en un sistema informático; dicho de otro modo, que las imágenes sean accesibles al ordenador. Esto depende de los soportes y formatos en los que se ofrecen los ND que definen los píxeles de la imagen.

6.2.1. Soporte físico de una imagen

Hasta hace poco tiempo, las imágenes de satélite solían distribuirse casi de modo exclusivo en cintas magnéticas compatibles (CCT). Se trata de un soporte barato y muy estándar, que era el más apropiado para almacenar un volumen considerable de información. Habitualmente, las imágenes se distribuían sobre CCT de 9 pistas (*tracks*), con una longitud de 2.400 a 3.600 pies. Los principales problemas que plantea una CCT son su acceso secuencial, que ralentiza el acceso a los datos, el alto coste de los equipos lectores y su escasa densidad de almacenamiento frente a las tecnologías actualmente disponibles.

Aunque ya existen otros soportes, más adecuados, para grabar datos digitales, todavía las CCT se siguen empleando de modo rutinario en la distribución de imágenes, especialmente si se pretende trabajar con una imagen de los primeros satélites Landsat. Al solicitar la imagen, el usuario debe especificar la densidad y el formato de grabación de los datos. En cuanto al primer aspecto, las opciones más habituales son 1.600 y 6.250 b.p.i. (*bits per inch*, bits por pulgada). Se denominan, en términos coloquiales, cintas de baja y alta densidad. Si el equipo informático lo permite, resulta más cómodo trabajar con cintas de alta densidad, ya que almacenan un mayor volumen de datos en el mismo espacio físico. Por ejemplo, un cuarto de escena del sensor TM precisa tres cintas de baja densidad para almacenar las 7 bandas, mientras sólo requiere una de alta densidad. Como es lógico, estas últimas precisan un acceso más sofisticado, por lo que las unidades lectoras superan notablemente los costes de los equipos de baja densidad.

El acceso a los datos se ralentiza por la disposición secuencial de los mismos. En pocas palabras, para leer una zona situada en la parte inferior de la imagen, es preciso recorrer los ficheros y/o líneas precedentes, hasta que se acceda al sector de interés, frente a los dispositivos de acceso directo, en los que toda la información está disponible inmediatamente. En trabajos de producción, sobre grandes espacios, esta labor de lectura puede resultar muy fatigosa. Esta dificultad es común a otros sistemas magnéticos más novedosos, como las cintas Exabyte de 8 ó 4 mm (muy comunes para estaciones de trabajo), o los cartuchos QIC-80 de 8 mm (bastante usados en la informática personal) (fig. 6.3). Sin embargo, frente a las CCT convencionales, estos sistemas almacenan mucha más información en menor volumen. Las cintas Exabyte, por ejemplo, pueden almacenar hasta varios Gigabytes de información, mientras una CCT a la máxima densidad de grabación (6250 bpi, bits por pulgada) no supera los 100 Mb. En este momento, lo habitual es que las empresas distribuidoras y agencias espaciales ofrezcan imágenes en Exabyte para las adquisiciones más recientes.

El desarrollo de los sistemas de grabación óptica y magneto-óptica facilitará la distribución regular de imágenes en estos soportes. Actualmente, ya son muy abundantes las bases de datos que se distribuyen en CD-ROM, que resulta un sistema muy compacto y muy estándar para grabar grandes volúmenes de datos (suelen contar con una capacidad de 650 Mb). El mapa digital del mundo (*Digital Chart of the World*) a escala 1:1.000.000, o los índices de vegetación generados a

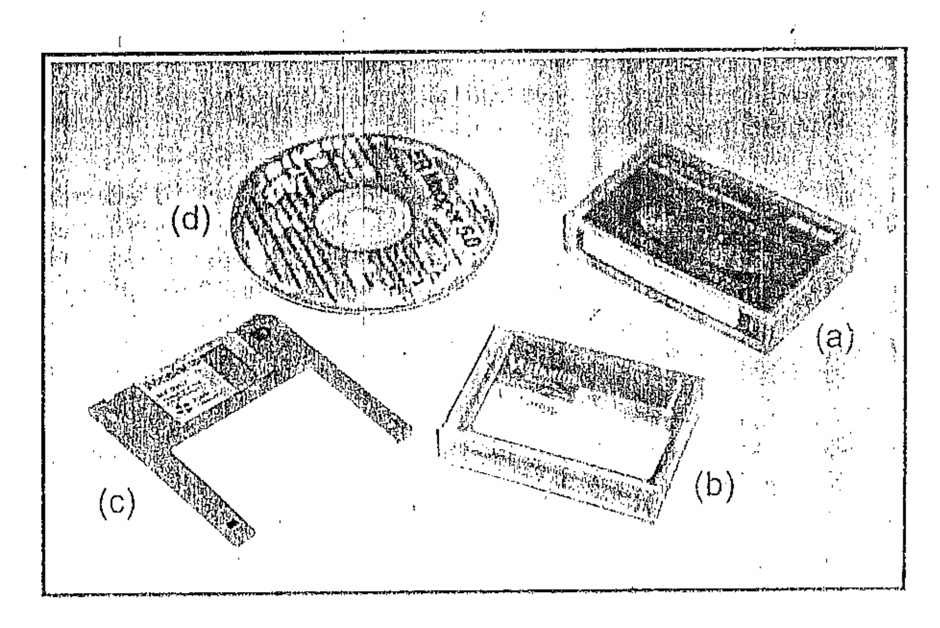


Fig. 6.3 - *Distintos medios para distribuir imágenes: (a) cintas Exabyte, (b) cartuchos, (c) disketes, (d) CD-ROM*

partir de imágenes AVHRR para todo el planeta son buenos ejemplos de la difusión de estas tecnologías de almacenamiento. Aunque todavía el proceso de grabación es lento, en un inmediato futuro pensamos que éste será el soporte más estándar para distribución de imágenes, ya que los lectores de CD-ROM son muy baratos y bastante estándar en la informática personal.

6.2.2. Formatos de grabación

Independientemente del soporte físico de la imagen, es necesario conocer el formato de grabación de la imagen, que indica la organización de los ND originalmente adquiridos por el sensor. En este sentido, conviene considerar la codificación aplicada y la organización lógica de los datos.

En lo que se refiere al primer punto, los ND de la imagen se graban en código binario (un bit indica una posición binaria, 0 ó 1). La mayor parte de los sensores emplean grupos de 8 bits para almacenar el ND correspondiente a cada píxel. Por ello, cada píxel se define por un *byte*, lo que equivale a un rango de 256 niveles (2^8, de 0 a 255). Éste es también el rango admitido por la práctica totalidad de los equipos de tratamiento digital, por lo que el acceso a las imágenes se simplifica notablemente. En el caso de algunos sensores, como el NOAA-AVHRR, la información se codifica en 1024 niveles (10 bits), por lo que se requiere una labor previa de compresión de datos para poder visualizar la información en pantalla (cap. 6.6). Asimismo, los modelos digitales del terreno, bastante utilizados como información auxiliar en la interpretación de imágenes, se codifican en un rango de 16 bits (lo que permite almacenar hasta 65.536 altitudes diferentes).

Las imágenes digitales se organizan en una serie de archivos (*files*), cada uno de los cuales se descompone en registros (*records*). Normalmente cada imagen incluye un archivo de cabecera (*header file*), en donde se almacena el formato con el que están grabados los ND que la componen, así como sus condiciones de adquisición (tipo de sensor, localización de la escena, día, elevación y acimut solar, etc.), y el tipo de correcciones aplicadas por la estación receptora.

Los registros son de longitud variable, de acuerdo al tipo de archivo y a la organización de los datos en la cinta. En el caso de las imágenes Landsat-TM que procesa la Agencia Espacial Europea, los archivos de imagen están organizados en registros de 3.600 bytes, mientras los archivos de cabecera cuentan con 360 y 4.300 bytes.

La distribución de los archivos en una cinta está en estrecha relación con el formato en que se graban los ND de la imagen. Los tres formatos más habituales son (fig. 6.4):

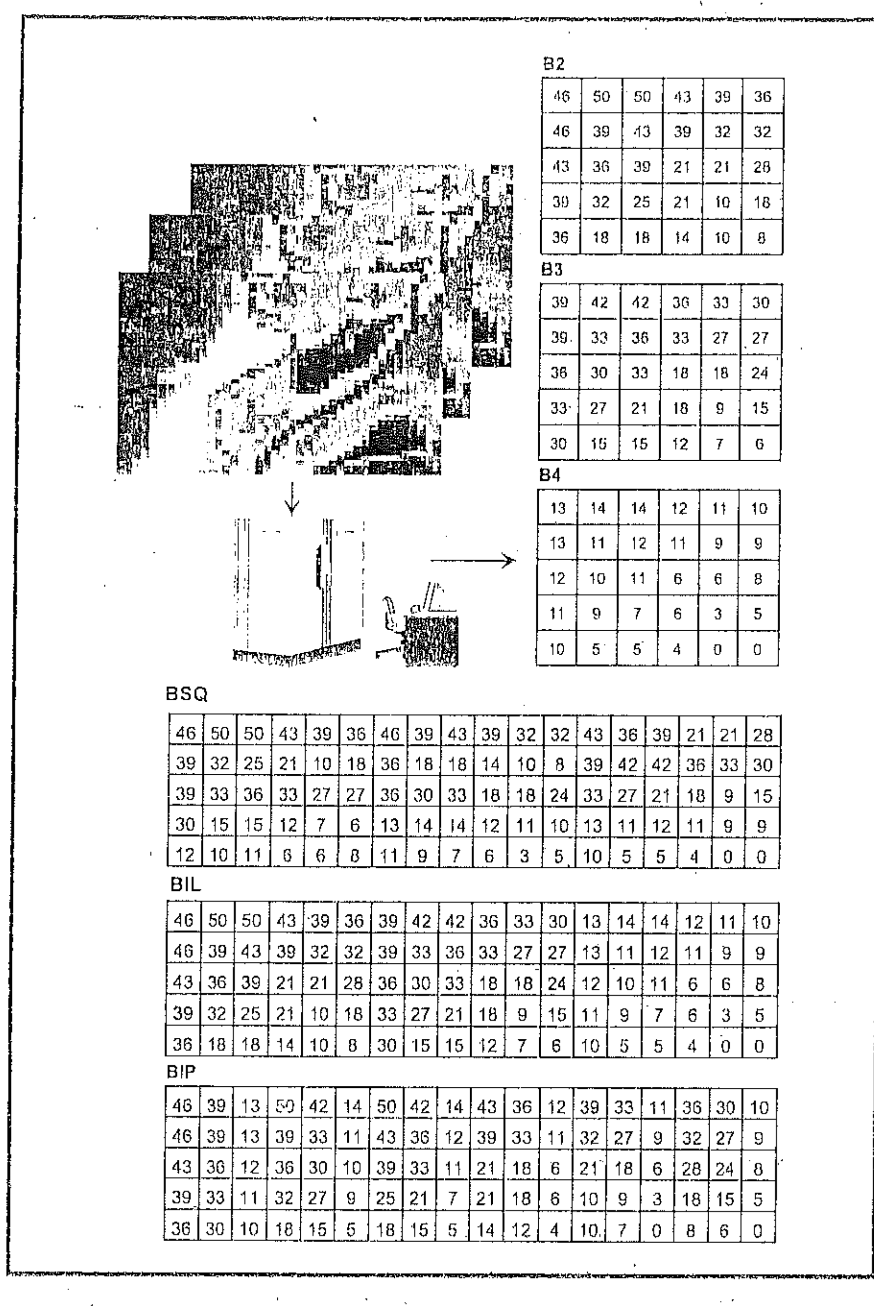
(i) Bandas secuenciales (*Band Sequential*, BSQ). Implica que los ND de cada banda se disponen uno a continuación del otro hasta completar todos los píxeles que la forman. Tras ellos, se sitúan los ND de la siguiente banda y así sucesivamente hasta completar todas las bandas espectrales de la imagen. Normalmente, entre banda y banda se inserta un archivo de cola y otro de cabecera, con objeto de identificar la región del espectro sobre la que se está recogiendo información. El formato BSQ permite una organización mejor estructurada de los datos, si bien retrasa la lectura de sub-imágenes, especialmente en soportes de acceso secuencial, en los que es preciso recorrer el conjunto de la cinta para acceder a todas las bandas. No obstante, es bastante habitual en la distribución de imágenes Landsat, al menos en las CCT distribuidas por la red europea EARTHNET.

(ii) Bandas intercaladas por línea (*Band Interleaved by Line*, BIL). En este caso, los ND se organizan por líneas en lugar de por bandas, disponiéndose consecutivamente los correspondientes a todas las bandas, para cada línea, antes de comenzar la línea siguiente. En definitiva, tras los ND de la línea 1, banda 1, se sitúan los correspondientes a la línea 1, banda 2, para luego continuar los de la banda 3, 4, etc., hasta completar el número total de bandas. Tras la primera línea de la última banda se sitúa la segunda línea de la banda 1, de la banda 2, y así sucesivamente. El formato BIL agiliza la lectura de sub-zonas dentro de la imagen. Resulta muy habitual en las imágenes SPOT-HRV, aunque también se utiliza con imágenes Landsat-TM o de otros sensores.

(iii) Bandas intercalas por píxel (*Band Interleaved by Pixel*, BIP). En lugar de alternarse los ND en cada línea, se alternan en cada píxel. Así, tras el ND correspondiente al píxel de la línea 1, columna 1, banda 1, aparece el correspondiente a la línea 1, columna 1, banda 2, seguido del adquirido para la línea 1, columna 1, banda 3, etc. Este formato es, hoy por hoy, poco frecuente, ya que fue ideado para agilizar la clasificación de sub-imágenes, cuando se empleaban equipos de escasa memoria. Este formato se aplicó a la distribución de imágenes en disquetes de 8 pulgadas, para alimentar los primeros equipos diseñados sobre micro-ordenadores.

6.3. Equipos de tratamiento digital de imágenes

Si en todos los capítulos de este libro resulta muy complejo mantener el material expuesto al día, esto es especialmente verdad cuándo nos referimos a los componentes físicos y lógicos de un equipo de tratamiento digital de imágenes, ya que la dinámica del mercado resulta realmente vertiginosa. No obstante, nos ha parecido oportuno mantener este capítulo para proporcionar al lector una idea, siquiera general, sobre los componentes necesarios para abordar la interpretación



B2

46	50	50	43	39	36
46	39	43	39	32	32
43	36	39	21	21	28
39	32	25	21	10	18
36	18	18	14	10	8

B3

39	42	42	36	33	30
39	33	36	33	27	27
36	30	33	18	18	24
33	27	21	18	9	15
30	15	15	12	7	6

B4

13	14	14	12	11	10
13	11	12	11	9	9
12	10	11	6	6	8
11	9	7	6	3	5
10	5	5	4	0	0

BSQ

46	50	50	43	39	36	46	39	43	39	32	32	43	36	39	21	21	28
39	32	25	21	10	18	36	18	18	14	10	8	39	42	42	36	33	30
39	33	36	33	27	27	36	30	33	18	18	24	33	27	21	18	9	15
30	15	15	12	7	6	13	14	14	12	11	10	13	11	12	11	9	9
12	10	11	6	6	8	11	9	7	6	3	5	10	5	5	4	0	0

BIL

46	50	50	43	39	36	39	42	42	36	33	30	13	14	14	12	11	10
46	39	43	39	32	32	39	33	36	33	27	27	13	11	12	11	9	9
43	36	39	21	21	28	36	30	33	18	18	24	12	10	11	6	6	8
39	32	25	21	10	18	33	27	21	18	9	15	11	9	7	6	3	5
36	18	18	14	10	8	30	15	15	12	7	6	10	5	5	4	0	0

BIP

46	39	13	50	42	14	50	42	14	43	36	12	39	33	11	36	30	10
46	39	13	39	33	11	43	36	12	39	33	11	32	27	9	32	27	9
43	36	12	36	30	10	39	33	11	21	18	6	21	18	6	28	24	8
39	33	11	32	27	9	25	21	7	21	18	6	10	9	3	18	15	5
36	30	10	18	15	5	18	15	5	14	12	4	10	7	0	8	6	0

Fig. 6.4 - *Formatos de grabación en una imagen digital. BSQ, Banda secuencial; BIL, bandas intercalas por línea; BIP, bandas intercaladas por píxel. Los píxeles tramados indican dónde comienza una nueva banda en cada uno de los tres formatos.*

digital de imágenes, así como las tendencias más recientes que se apuntan en esta línea. Describimos, en primer lugar, los componentes físicos (*hardware*), para luego comentar el esquema de los programas de aplicación (*software*). Finalmente, presentamos algunos sistemas que integran las principales operaciones de interpretación digital.

6.3.1. Componentes físicos

El rango de operaciones que ofrece un sistema de tratamiento digital de imágenes depende no sólo de las características de los programas, sino también, y principalmente, de las prestaciones de los componentes físicos. Si bien el usuario no tiene tanta relación con éstos como con los programas de aplicación (*software*), es evidente que cualquier programa se ejercita en los recursos físicos que le brinda el sistema. Por ello, conviene repasar, en primer lugar, los componentes más habituales en un equipo de tratamiento digital, de cara a comprender mejor las posibilidades de los distintos sistemas en el mercado, y planear con mayor acierto su uso o adquisición.

Podemos agrupar el estudio de los componentes físicos en tres apartados, de acuerdo a las tres operaciones básicas en cualquier sistema informático: entrada de datos, proceso-almacenamiento, y salida de resultados (fig. 6.5).

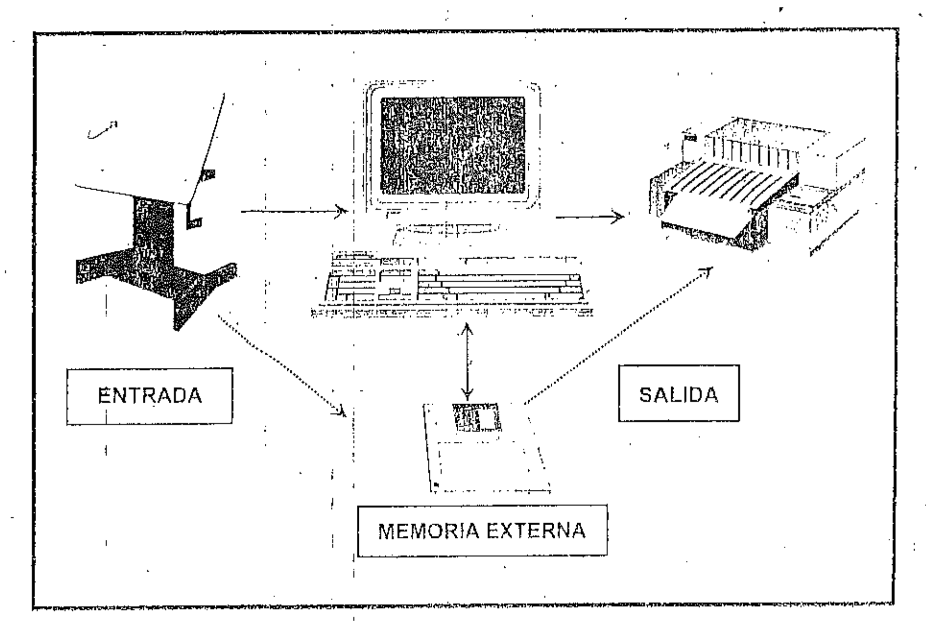


Fig. 6.5 - *Flujo de información en un ordenador*

6.3.1.1. Unidades de entrada de información

Tienen por misión poner en contacto a la máquina con el mundo exterior, encargándose tanto de la adquisición de los datos como de introducir las instrucciones precisas para el control del proceso. Los primeros ordenadores recibían las instrucciones del usuario a través de unas tarjetas o cintas de papel perforadas. Suponían un medio muy barato, pero extremadamente fatigoso para trabajar sobre grandes volúmenes de datos. Actualmente, el diálogo con la máquina resulta mucho más interactivo, gracias a los teclados y terminales alfanuméricos. Junto al teclado, el tratamiento digital de imágenes incorpora otros medios de entrada de información, como son las unidades lectoras de cinta, cámaras de vídeo, rastreadores electrónicos, digitizadores o ratones electrónicos (Rosch, 1994; fig. 6.6).

No obstante, el TECLADO (*keyboard*) sigue siendo imprescindible para orientar el proceso de tratamiento. Aunque presenta una configuración muy similar

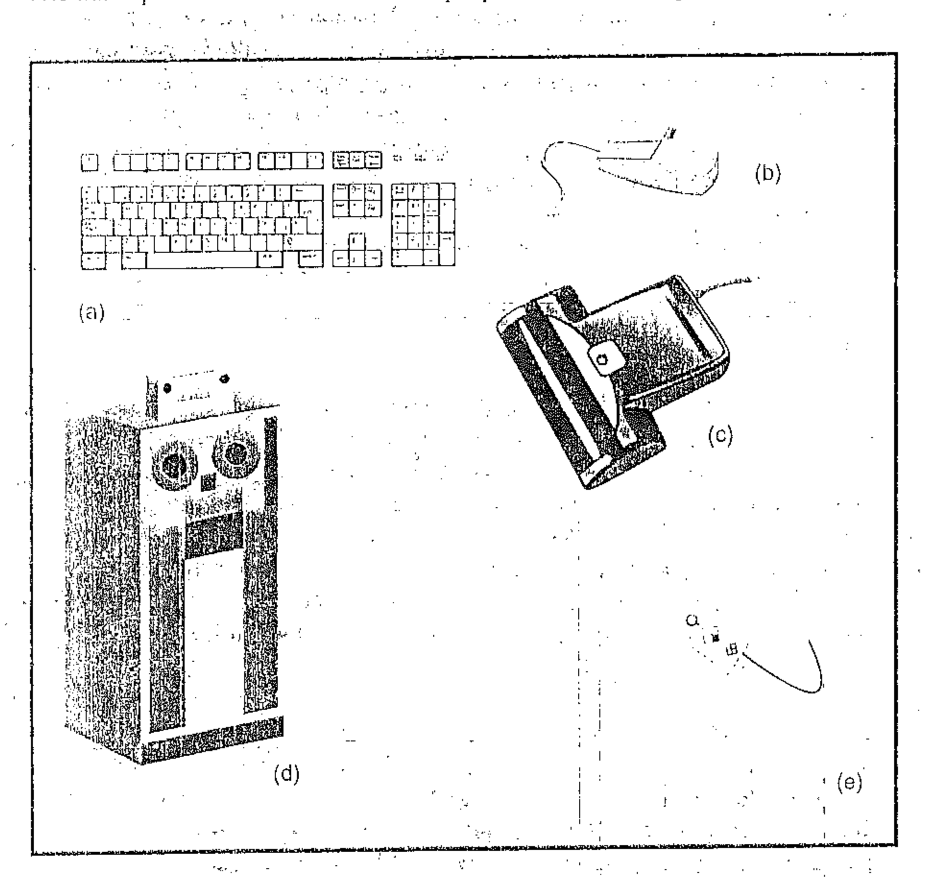


Fig. 6.6 - *Unidades de entrada: (a) teclado, (b) ratón electrónico, (c) escáner, (d) lector de cinta, (e) digitizador.*

a las máquinas de escribir, cuenta con algunos elementos originales, como son las teclas de control (ALT, CTRL y teclas de función, F1 a F12) —que amplían el rango de posibilidades que brindan los caracteres alfanuméricos—, y las que permiten desplazar el cursor en pantalla. El teclado es el medio más habitual para controlar la ejecución de un programa, puesto que permite introducir instrucciones con gran simplicidad.

La creciente tendencia hacia un uso cada vez más interactivo del ordenador ha popularizado enormemente el RATÓN ELECTRÓNICO (*mouse*), que hoy se considera una pieza básica en cualquier entorno gráfico. El cometido del ratón es facilitar el movimiento del cursor en la pantalla, ya sea para dibujar interactivamente o para señalar diversas opciones de un programa. La tecnología empleada hasta el momento nos permite hacer una división entre los mecánicos y los ópticos. En el primer caso, el movimiento del cursor se consigue por el desplazamiento de una bola situada en la parte inferior del aparato. Unos sensores detectan el movimiento en dos direcciones, transmitiéndolo al ordenador. La otra alternativa es el empleo de un rayo de luz que detecta el movimiento sobre una superficie especial. Estos ratones ópticos son todavía bastante empleados en las estaciones de trabajo, mientras los mecánicos son casi exclusivos en la informática personal. En ambos casos, los ratones disponen de uno o varios botones para señalar distintas opciones de un programa. Conviene tener presente que un ratón electrónico sólo registra las coordenadas relativas de su posición en el plano en que se mueve.

Cualquier combinación de las tecnologías antes referidas sirve para presentar otros sistemas de apuntar interactivamente, como es el caso del ADAPTADOR DE JUEGOS (*joystick*). Está formado por una rótula que gira en cualquier dirección de los 360° del plano, y que lleva una serie de interruptores anejos para aceptar distintas opciones de un programa. La miniturización que lleva consigo el empleo de ordenadores portátiles ha implicado reducir notablemente el tamaño de estos apuntadores, apareciendo botones, rótulas giratorias y superficies sensibles al tacto. Las pantallas táctiles, muy utilizadas en marketing, apenas se emplean en la informática gráfica, ya que resulta un medio poco preciso y muy fatigoso de señalar áreas sobre el monitor. Algo similar cabe decir de los lápices ópticos.

Antes indicamos que el ratón o cursor no permite señalar coordenadas absolutas, ya que su movimiento es relativo. En muchas ocasiones resulta necesario introducir al ordenador algún tipo de información vectorial (límites municipales, mapas de suelos, carreteras, etc.), para que sea combinada con las imágenes que pretenden analizarse. En esos casos, se requiere el auxilio de un DIGITIZADOR (*digitizer*), que permite registrar, con mucha precisión, coordenadas absolutas. Hay varias tecnologías disponibles (Rosch, 1994), si bien los digitalizadores más comunes son los electromagnéticos y foto-voltaicos. En

el primer caso, el más habitual, la tabla de digitización está compuesta por una matriz de circuitos colocados debajo de una superficie plana, de tal manera que puede detectarse el punto exacto donde se encuentra un cursor conectado a la misma. Basta recorrer con el cursor la línea o puntos que pretendamos digitizar para que se transmitan al ordenador sus coordenadas sobre la tableta. A partir de ahí, pueden convertirse éstas a un sistema de referencia común para que ambos documentos puedan ponerse en relación. La posición del cursor puede registrarse por dos procedimientos: punto a punto, para lo que es preciso apretar uno de los botones del cursor; o continuo, en el que el ordenador recibe coordenadas mientras el cursor se está moviendo sobre el papel. La creciente conexión entre la teledetección y los sistemas de información geográfica (cap. 9), lleva consigo un papel más destacado para el digitizador, sirviendo ya para la corrección geométrica de las imágenes (6.5), ya para la entrada de información auxiliar o la verificación de resultados (cap.8).

En lo que se refiere a la introducción de las imágenes al sistema, el medio más habitual ha sido hasta hace muy poco tiempo la UNIDAD LECTORA DE CINTA (*Tape Drive*). Como antes se comentó, la cinta magnética compatible con ordenador (CCT) ha resultado el soporte estándar para distribuir imágenes de satélite, aunque la tendencia sea a tecnologías ópticas (CD-ROM) o magnético-ópticas (discos ópticos regrabables), que permiten almacenar la información de modo más compacto. La unidad lectora de cinta, no obstante, sigue siendo una pieza importante de un equipo de tratamiento, ya que resulta un formato de transferencia de información muy estándar. Es similar a las conocidas cintas «cassete», en el sentido de que pueden grabarse y leerse tantas veces como se considere oportuno. Por tanto, la unidad lectora de cinta también puede utilizarse como unidad de grabación, transfiriendo a una CCT imágenes u otros datos de interés para su almacenamiento permanente.

Las unidades de cinta son relativamente caras, por lo que algunos equipos de tratamiento digital reciben las imágenes a través de su conexión con un ordenador central, en donde se dispone de esas unidades. Tal conexión puede realizarse a través de una red local (*Local Area Network, LAN*) o de un MODEM de comunicaciones. En el primer caso, normalmente la velocidad de transferencia es mucho mayor. El modem resulta un medio de comunicación muy extendido, especialmente a partir de la popularización del trabajo informático en el hogar. Permite recibir datos a través de la línea telefónica convencional, gracias a un programa de comunicaciones apropiado. El acceso puede realizarse en los dos sentidos, recibiendo o enviando datos o imágenes, desde o hacia un ordenador distante. Esto evita contar con múltiples periféricos de entrada o salida para sistemas de tratamiento digital de bajo coste. Sin embargo, la velocidad de transferencia (normalmente 14.400 baudios) no resulta muy apropiada para grandes volúmenes de datos, como es el caso de la recepción de imágenes, por lo que no puede plantearse actualmente como una alternativa para la distribución. Esta situación

puede cambiar en un inmediato futuro, pues la tendencia clara es aumentar las velocidades de transferencia (en poco tiempo serán estándar los modem a 28.800 baudios).

Como es lógico, estos sistemas de comunicación no sólo sirven para la lectura de imágenes, sino también para transferir información entre usuarios. Gracias a la creciente tendencia a la conectividad, es posible transmitir información a través de redes mundiales de ordenadores, permitiendo acceder a imágenes, algoritmos de tratamiento o publicaciones a un costo muy reducido. Habitualmente, la conexión a esta red de ordenadores, la más popular conocida como Internet, se realiza a través de nodos locales, mediante redes específicas o mediante línea telefónica convencional. Las posibilidades de estas redes de comunicación electrónica están todavía iniciándose, aunque ya se contemplan enormes posibilidades. La más inmediata, y ampliamente utilizada, es el correo electrónico, que permite una comunicación ágil, bastante segura y muy económica entre usuarios remotos. En nuestro ámbito de estudio, resulta de gran interés el acceso a información gráfica a través de la *World Wide Web*, que permite visualizar imágenes situadas en servidores remotos. Esto facilita, por ejemplo, inspeccionar la calidad de una imagen antes de adquirirla, o leer un artículo, con gráficos o imágenes incorporados, antes de que se publique en una revista científica. A través de los sistemas de transferencia de ficheros (el más conocido es el *File Transfer Protocol*, FTP), pueden importarse directamente programas, datos o imágenes de libre acceso, o recibir imágenes en tiempo cuasi real que más tarde se abonarán por medios convencionales o a través de tarjeta de crédito (ver apéndice I).

Volviendo a los periféricos de entrada de información, conviene tener presente que si bien la mayor parte de las aplicaciones del tratamiento digital de imágenes se basan en sensores que adquieren la información en soporte digital, puede ocurrir que partamos de imágenes en papel, o simplemente que pretendamos introducir en el análisis otros documentos convencionales, como fotografías aéreas. En estos casos, es preciso contar con un instrumento que transforme niveles de gris a valores numéricos (ND), que puedan más tarde ser analizados por el ordenador. Los instrumentos más empleados con este fin son la cámara de vídeo (*video camera*) y el rastreador electrónico (*scanner*).

La CÁMARA DE VÍDEO permite digitizar cualquier documento analógico, tanto fotografías como mapas, en blanco y negro o color, gracias al empleo de filtros. La imagen «capturada» se transmite al ordenador que soporta la cámara, codificándose los tonos de gris en valores numéricos para su posterior análisis. Las cámaras de vídeo han sido muy utilizadas en el tratamiento digital de imágenes, especialmente para digitizar fotografías aéreas. Su principal problema estriba en ser muy dependientes de las condiciones de iluminación, ya que digitizan la imagen a cierta distancia del original. Por ello, es difícil calibrar el resultado,

perdiéndose la relación entre los ND y la radiancia originalmente detectada por el sensor.[1]

En los últimos años las cámaras de vídeo se van sustituyendo por otros equipos de digitización de imágenes más precisos. El más ampliamente utilizado es el RASTREADOR o lector de barrido (*scanner*). Se trata de un instrumento que permite digitizar automáticamente un texto o imagen a partir de un soporte en papel. El proceso se basa en un dispositivo con puntos de luz que rastrea en el papel la densidad de gris impresa. La imagen o texto detectado se transmite al ordenador, convirtiendo dicha densidad de gris en un código numérico a espacios regulares de acuerdo a la resolución del aparato. Al contrario que en la cámara de vídeo, el documento a digitizar está en contacto directo con el instrumento lector, por lo que es menos sensible a las variaciones de iluminación que aquélla. Existen tres tipos de rastreadores: (i) de tambor, en los que el documento se fija a un rodillo, (ii) planos, muy similares a una fotocopiadora en su aspecto y funcionalidad, y (iii) manuales, bastante empleados en el diseño gráfico de bajo coste, pero que no ofrecen una buena precisión geométrica para nuestro ámbito. También están muy extendidos los rastreadores en color, que permiten digitizar una fotografía aérea o mapa separando sus tres componentes lumínicos (rojo, verde y azul).

6.3.1.2. Unidades de proceso y almacenamiento.

El centro neurálgico del ordenador es la unidad central de proceso (*Central Processing Unit*, CPU). Es la base de funcionamiento de la máquina: recibe los datos de las unidades de entrada —normalmente a través de los dispositivos de almacenamiento externos, discos fijos o disquetes—, los almacena provisionalmente en la memoria central, los procesa de acuerdo a las instrucciones que recibe del usuario, a través de un programa, y envía los resultados a una unidad externa. La CPU cuenta con dos componentes: unidad de control y unidad aritmético-lógica.

La unidad de control es el dispositivo que dirige las operaciones realizadas en la CPU, coordinando los elementos de entrada, proceso y salida en el ordenador. Para guiar la cadencia de operaciones dispone de un reloj electrónico de alta frecuencia que, a intervalos regulares, genera los pulsos eléctricos que marcan el ciclo base de la máquina. Esta frecuencia refleja, de alguna forma, su velocidad de proceso. El procesador Intel 8088 (incluido en los primeros IBM PC y compatibles) trabajaba a una velocidad máxima de 5 MHz; el 80286 tenía su techo en 12 MHz; el 80386 en 25 MHz; el 80486 en 100 Mhz, y el Pentium, por el momento, a 166 Mhz (ya está disponible la nueva generación, Pentium Pro). En términos más precisos, la velocidad del procesador suele medirse en millones de instrucciones por segundo (MIPS), o en millones de instrucciones de punto flotante (MFLOPS). Los avances, también en este parámetro han sido muy espectaculares, pasándose de 0,75 MIPS para los primeros procesadores Intel 8088, hasta los 150 MIPS de los actuales Pentium. Otros elementos a tener en cuenta en la velocidad final de la máquina son la velocidad de acceso a los periféricos (tipo de bus o canal empleado) y la longitud de datos de proceso simultáneo; esto es, el número de bits que puede analizar a la vez. En este sentido, los procesadores más recientes permiten trabajar con 32 bits, mientras los primeros ordenadores personales sólo admitían 8 bits. Para el caso de ordenadores de mayor potencia las longitudes oscilan entre 64 y 128 bits.

La unidad aritmético-lógica es el componente de la CPU que realiza los cálculos y las operaciones con los datos indicados en las instrucciones. Permite tanto operaciones aritméticas (las cuatro elementales), como relaciones lógicas entre datos (=, >, <, ≥, ≤). A partir de combinaciones de ambos tipos, pueden realizarse operaciones más complejas. Especialmente gracias a las operaciones lógicas puede controlarse la ejecución de un proceso, optando hacia una alternativa u otra en función del resultado de una comparación. Este tipo de operaciones se realizan mediante *hardware*.

La memoria sirve para almacenar provisionalmente los programas que serán ejecutados por el ordenador, así como los datos de entrada y los resultados. La capacidad de memoria es un dato fundamental a la hora de evaluar la potencia de un ordenador, pues no podrán procesarse programas o datos que excedan la memoria disponible. Como es sabido, suele distinguirse entre memoria de acceso directo (RAM) y memoria permanente (ROM). La mayor parte de los ordenadores personales cuentan ya con una memoria mínima de 8 Mb (1 Megabyte= 1.024 Kb) de RAM, si bien la tendencia es a disponer de 32 Mb. Los denominados 'ordenadores mini' y estaciones de trabajo, cuentan usualmente con una memoria inicial de 32 Mb, mientras los medios y grandes pueden admitir hasta varias decenas de Gb (1 Gigabyte = 1.024 Mb).

Las tendencias de la informática de «sobremesa» (*desktop computing*) supondrán un incremento de las capacidades de los ordenadores personales y una creciente convergencia con las estaciones de trabajo. Actualmente, los costes y las prestaciones están experimentando un sensible acercamiento entre ambos mundos, de momento sólo separados por el sistema operativo dominante. En cuanto a las máquinas más potentes, se enfatiza el procesamiento en paralelo de la infor-

[1] Mención aparte merecen las cámaras de vídeo digital, que se utilizan como sensores a corta distancia (en aviones de baja altura o globos), y ofrecen una información muy interesante para validar la adquirida por sensores espaciales o en estudios de gran escala. Aunque en este tratado no hemos incluido la videografía, por no tratarse propiamente de un sistema espacial de teledetección, conviene mencionar que se ofrece notables ventajas frente a la fotografía aérea o los «barredores electrónicos» convencionales.

mación (varios procesadores, cada uno dedicado a una tarea), los dispositivos de memoria de acceso directo (*array processors*), los procesadores gráficos integrados y las tecnologías RISC (*Reduced Instruction Set Computer*) (Faust et al., 1991).

En el capítulo del almacenamiento de datos, los ordenadores cuentan, junto a la memoria central (RAM), con unidades externas de almacenamiento. Los datos se almacenan provisionalmente en la memoria del ordenador, pero se destruyen una vez que se corta el suministro eléctrico. Para garantizar un almacenamiento más estable de los datos, éstos se envían a una serie de dispositivos externos. Las posibilidades, en este sentido, son muy variadas. En la informática personal los más empleados son los disquetes (*floppies*) y discos fijos (*hard disk*), y, más recientemente, los discos ópticos y cintas de cartucho.

Los disquetes o discos flexibles, están formados por una superficie blanda y flexible de plástico, tipo celuloide, recubierto de óxidos ferrosos por una o ambas caras. Esta superficie está protegida por una funda de plástico, para evitar el contacto con partículas que podrían dañar la información en él grabada. En el centro del disquete, un orificio circular permite acoplar el sistema de lectura o grabación, que se realiza a lo largo de una abertura alargada situada en la parte inferior de la funda protectora. Existen distintos tipos de disquetes, de acuerdo al tamaño y a la cantidad de información que pueden almacenar. Tras los iniciales disquetes de 5,25 pulgadas, que almacenaban 360 Kb (doble cara y densidad), ó 1,2 Mb. en alta densidad (HD), los más populares actualmente son los disquetes de 3,5 pulgadas, menos precarios que los anteriores por estar protegidos por una funda rígida de plástico. Almacenan 720 Kb ó 1,44 Kb, según la densidad de grabación. La principal ventaja de los disquetes es su bajo coste y transportabilidad, pues facilitan el trasvase de información entre ordenadores cuando éstos no están conectados en red (siempre que cuenten con el mismo sistema operativo). Su principal inconveniente radica en su reducida capacidad de almacenamiento, varios cientos de veces inferior a los discos fijos.

Los discos fijos, rígidos o duros, están diseñados a partir de un soporte metálico indeformable, generalmente aluminio, recubierto de una capa magnetizable, que le da al disco larga vida y permite grabar datos con alta densidad. Gracias a ello, almacenan mucha más información que los disquetes, y el acceso a ella se realiza a mayor velocidad. Son, además, mucho más fiables y resistentes, por lo que constituyen el medio idóneo de almacenamiento, tanto en ordenadores personales como medios y grandes. Al igual que los disquetes, los discos fijos son dispositivos de acceso directo; esto es, puede recuperarse un determinado archivo sin considerar el resto, pues cada sector físico tiene una dirección determinada. En tratamiento digital de imágenes conviene que se cuente con discos de gran capacidad de almacenamiento, puesto que se trata de una aplicación que maneja un enorme volumen de datos. Gracias a las sensibles reducciones en el coste de almacenamiento, resulta ahora mucho más accesible contar con el

espacio requerido para la interpretación digital de imágenes. Para un ordenador personal es recomendable contar con un disco duro no inferior a 1 Gb (1024 Mb). Ya existen varios modelos de discos magnéticos removibles, lo que permite incrementar notablemente la capacidad de almacenamiento virtual.

Los discos ópticos emplean la tecnología láser para almacenar grandes volúmenes de datos. Un rayo láser de alta potencia altera la superficie del disco de acuerdo a un código binario. Posteriormente, otro rayo de menor potencia, es capaz de registrar esas alteraciones y decodificar la información almacenada en el disco. Esta tecnología presenta el problema de que sólo puede alterarse una vez: en otras palabras, no puede modificarse la información sobre él grabada, aunque puede leerse tantas veces como sea preciso (al igual que un compacto musical). En consecuencia, sólo son útiles para retener copias de seguridad de las imágenes originales —en lugar de acceder a ellas a partir de la CCT, que resulta un procedimiento mucho más tedioso—, o los resultados finales, y no para procesos intermedios. Sus principales ventajas son la gran capacidad de almacenamiento, alta velocidad de acceso y bajo coste, además de ser mucho más fácilmente transportables que las CCT. En los últimos años, está ganando aceptación la tecnología de los discos magneto-ópticos regrabables. Ofrecen ventajas intermedias entre las dos tecnologías: son algo más lentos que los discos magnéticos, pero almacenan mayor información al mismo coste. Los discos magneto-ópticos también pueden utilizarse para almacenar copias de seguridad (*backup*)

Como pone en evidencia Mather (1987), el almacenamiento es precisamente uno de los principales problemas del tratamiento digital de imágenes en teledetección, dado el gran volumen de datos que alberga cada imagen. Por ejemplo, para almacenar una escena completa del sensor Landsat-MSS, se necesitan 32 Mb (4 bandas x 2.286 líneas x 3.600 columnas x 8 bits por píxel), elevándose la cifra a 262 Mb en el caso del sensor Landsat-TM. Parece obvio que no pueden almacenarse muchas imágenes en la memoria externa. Ordinariamente, se trasvasan al disco magnético sólo aquellas imágenes que se requieran en un momento determinado. Si ese proceso debe realizarse con frecuencia, puede resultar conveniente almacenar las imágenes en discos ópticos, lo que facilitará el acceso a sub-imágenes con mucha mayor rapidez y eficacia.

6.3.1.3. Unidades de salida.

Una vez realizado el proceso, el usuario requiere obtener un registro del análisis efectuado, lo que se obtiene a través de una serie de periféricos de salida gráfica (fig. 6.7).

El MONITOR o consola de visualización resulta una pieza imprescindible en un equipo de tratamiento de imágenes, ya que garantiza un trabajo

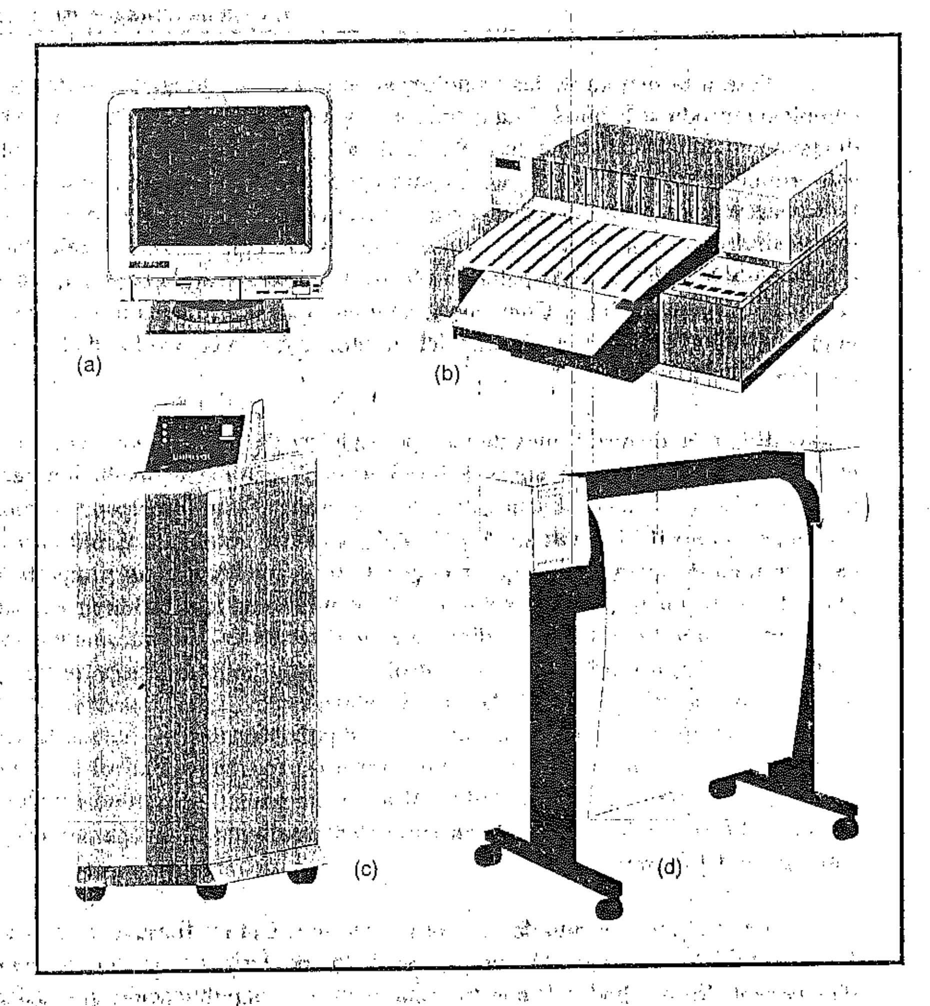


Fig. 6.7 - *Periféricos para producir resultados: (a) monitor, (b) impresora, (c) filmadora digital, (d) trazador de inyección de tinta.*

interactivo con la máquina. Si se emplean ordenadores medios o grandes, este monitor será uno de los terminales conectados a la unidad central. En este caso, el monitor servirá para visualizar instrucciones alfanuméricas. En el caso de los ordenadores personales y estaciones de trabajo, lo habitual es disponer de monitores gráficos, que permiten mayores posibilidades para la representación visual de información (mapas, gráficos, imágenes). La información que se visualiza en el monitor no se lee directamente del disco, ya que la velocidad de acceso a un disco es muy inferior a la requerida para lograr la impresión visual de una imagen estable. En consecuencia, es preciso almacenar las imágenes en una memoria intermedia, con gran frecuencia de acceso, denominada memoria de refresco (*refresh buffer*). La cantidad de información que visualiza un monitor depende de dos parámetros:

la resolución máxima del propio monitor (número de píxeles y número de colores), y de la memoria de la tarjeta gráfica. Un buen monitor no es suficiente para lograr una adecuada visualización de la imagen, sino que es preciso contar con una memoria gráfica adecuada. Entre los sistemas tarjeta-monitor que han sido más utilizados en la informática personal cabe citar los siguientes: Hércules, monocromo, resolución de 640 x 400 puntos; CGA, 4 colores, 320 x 200 puntos; EGA, 16 colores, 600 x 350 puntos; VGA, 64 colores, 640 x 480 puntos, y SVGA, 256 colores o más, y hasta 1280 x 1024 puntos.

Estos sistemas estándar no ofrecen la calidad suficiente para aprovechar adecuadamente la información visual que contiene una imagen. Por ello, los equipos de tratamiento digital suelen contar con procesadores de imagen o tarjetas gráficas más potentes, y también mucho más costosas, que las tarjetas convencionales. Actualmente el estándar en el mercado va desde los 800 x 600 a los 2048 x 2048 píxeles, si bien éstos últimos son poco comunes. La resolución del equipo de visualización no sólo se indica por el número de píxeles que puede albergar, sino también por el número de colores que puede direccionar para cada píxel. Habitualmente, este dato se indica en número de niveles de gris por cada uno de los tres cañones de color (rojo, verde y azul). Un equipo de 12 bits puede visualizar 4 bits por color (16 tonos de color, 2^4), mientras uno de 24 bits facilita 256 niveles por color (2^8, 8 bits), lo que equivale a 16,8 millones de tonalidades. Estos últimos se denominan sistemas de color real, ya que la imagen originalmente suele codificarse en 256 ND. Incluso resulta bastante común encontrar equipos de 32 bits, 8 por cada uno de los 3 cañones de color, más otros 256 colores para el plano gráfico, que suele emplearse para almacenar información de referencia (anotaciones, gráficos). El producto del número de píxeles por el número de bits por píxel no puede superar la memoria gráfica de la tarjeta. Una tarjeta de 4 Mb puede visualizar una imagen de 1024 x 768 píxeles (1 Mb) con 32 bits por píxel, lo que resulta adecuado para la interpretación digital de imágenes. Por su parte, una mas estándar de 2 Mb implicará, o bien reducir el tamaño de la imagen visualizada, o bien el número de colores asignado a cada píxel (hasta 1024 x 768 píxeles y 65.536 colores, o hasta 800 x 600 píxeles con 16,8 millones de colores). Esto puede no ser un problema excesivo, ya que algunos autores han demostrado que basta un número relativamente pequeño de colores (entre 256 y 4096) para lograr una impresión visual de suficiente calidad para no ser distinguible del color real.

El principal inconveniente de cualquier monitor radica en la caducidad de la visualización. En la mayor parte de las ocasiones resulta preciso conservar un registro más permanente del trabajo efectuado, ya sea de las imágenes tratadas, ya de parámetros estadísticos que afecten al tratamiento o a los resultados.

El medio más económico y rápido de obtener esta información en papel es una IMPRESORA. Actualmente existen muy diversos modelos y tecnologías

de impresoras. Entre ellas, las más comunes han sido hasta hace muy poco las impresoras matriciales, que construyen los caracteres a partir de una cadena de agujas impactando sobre una cinta tintada. Todavía existen múltiples modelos en el mercado, son baratas y permiten imprimir tanto texto como gráficos. Se emplean, sobre todo, para los resultados estadísticos del tratamiento digital, si bien pueden asimismo utilizarse para obtener mapas de clasificación de bajo coste y calidad, ya sea por combinación de letras y números, ya empleando la modalidad gráfica de impresión. En el caso de los ordenadores medios y grandes, las impresoras de línea son más comunes que las matriciales. Su velocidad de escritura es muy superior, puesto que escriben todos los caracteres de una línea simultáneamente. En contrapartida, no permiten impresión gráfica, sólo caracteres alfanuméricos, por lo que sus posibilidades cartográficas se reducen al empleo de letras o símbolos sobre-impresionados.

Si se pretende obtener una copia del mapa o imagen de mayor calidad, habremos de acudir a impresoras que permiten obtener color. Aunque existe una modalidad de impresoras matriciales en color, no resulta ésta una tecnología aceptable para este fin. Mucho más convenientes son las impresoras de chorro de tinta (*ink-jet printers*), actualmente las más demandadas en la informática personal. En este caso, las agujas se sustituyen por unos cartuchos con las cuatro tintas elementales (negro, amarillo, magenta y cian), a partir de los cuales puede construirse una amplia paleta de colores. Permiten también obtener texto y gráficos, ofrecen precios muy competitivos y una calidad suficientemente buena para la realización de trabajos de campo o presentaciones modestas.

Sin duda la tecnología que ha experimentado un mayor desarrollo y aceptación ha sido la impresión electrostática. Las popularmente denominadas impresoras láser se basan en una técnica similar a las fotocopiadoras. Un rayo láser induce una carga eléctrica sobre las zonas del papel que corresponden a la figura o texto que quiere reproducirse. Posteriormente, estas zonas sensibilizadas atraen un tóner químico para formar la imagen original. Estas impresoras proporcionan muy buena calidad de impresión, alta velocidad y bajo nivel de ruido. Su precio también se ha reducido drásticamente en los últimos años, formando ahora parte del equipamiento habitual en la informática doméstica. Por el contrario, las impresoras láser en color resultan todavía excesivamente costosas, pero proporcionan una calidad de impresión casi fotográfica.

La impresión de alta calidad en color se ha asociado en los últimos años a las tecnologías de transferencia térmica. Este sistema mejora notablemente la resolución y el número de colores obtenidos por las impresoras de inyección de tinta. En su relación calidad-coste, pueden resultar el complemento idóneo para un equipo de tratamiento basado sobre un ordenador personal. Una limitación importante, tanto de las impresoras de transferencia térmica como las de inyección de tinta, es que resultan caras de mantener, debido al elevado coste de los consumibles.

Pese a la mejora de las tecnologías de impresión, todavía resulta muy complejo reproducir la amplísima gama tonal de una imagen. Por ello, estos medios son muy adecuados para mapas de clasificación, donde existen pocos colores a discriminar, pero resultan deficientes para visualizar el rango tonal completo de la imagen. El sistema más sencillo para resolver esta limitación es fotografiar el monitor de visualización. Basta emplear una cámara convencional, preferiblemente con tele-objetivo, para paliar el efecto de curvatura de la pantalla, y con película de alta sensibilidad. Conviene utilizar un trípode para evitar movimientos imprevistos de la cámara, puesto que deberá utilizarse una baja velocidad de exposición.

Este método resulta muy directo, pero adolece de ciertos problemas, como el difícil control de las condiciones de iluminación, la pérdida de resolución frente al monitor, y el efecto de curvatura de la pantalla. Estos problemas pueden solventarse con FILMADORAS ANALÓGICAS O DIGITALES. En el primer caso, se trata de instrumentos que recogen la señal del vídeo a una superficie plana, herméticamente cerrada, sobre la que se aplica una cámara convencional. Las digitales imprimen los datos directamente desde el disco. Este sistema, resuelve los problemas de enfoque y control de la iluminación, y permite filmar imágenes mucho más grandes que las visualizadas en el monitor (hasta 4096 x 2048 píxeles). Aunque resulta más caro que un equipo fotográfico, es una solución ideal para un pequeño departamento universitario o empresa, pues el mantenimiento es muy sencillo y la calidad tonal idónea. La principal limitación viene dada por el formato de exposición (máximo 35 mm) y, en ocasiones, la compleja calibración del aparato.

En el rango más alto de calidad y coste se sitúan las filmadoras de gran formato, los plotter electrostáticos y láser. Estos periféricos permiten conectar directamente los resultados de nuestro tratamiento con su publicación, sin mediar técnicas fotográficas convencionales.

6.3.2. Componentes lógicos: *Software*

Obviamente cualquier sistema informático debe conjugar sus componentes físicos con los programas de aplicación, que controlan el funcionamiento del *hardware* hacia un determinado objetivo (fig. 6.8). Ambos componentes están íntimamente unidos en un equipo de tratamiento digital de imágenes, puesto que se trata de sistemas orientados hacia una aplicación particular. En otras palabras, el tipo de componentes físicos del equipo condiciona el rango de operaciones que le permite realizar al usuario.

Dentro de los componentes lógicos de un ordenador, suelen distinguirse dos categorías básicas: sistema operativo y programas de aplicación. El sistema

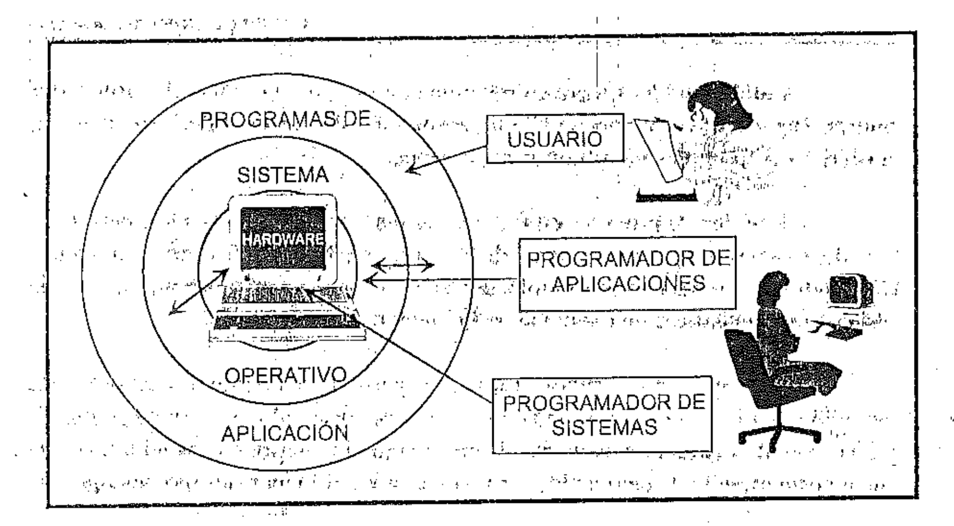


Fig. 6.8 - *Relaciones entre hardware, sistema operativo y programas de usuario*

operativo es un conjunto de programas y comandos que organizan el flujo de información y el control de los periféricos que posee el ordenador. Juega el papel del director de orquesta, que integra todos los elementos para asegurar un funcionamiento armónico. Será conveniente que el usuario conozca los comandos del sistema operativo para asegurar un diálogo inteligente con la máquina. Hay que tener en cuenta que, en los ordenadores más recientes, el sistema operativo no está ligado exclusivamente a una máquina, por lo que los programas de aplicación pueden transportarse de un ordenador a otro, siempre que, lógicamente, posean el mismo sistema operativo (con los periféricos pertinentes). Todavía hoy, los sistemas operativos más utilizados son el MS-DOS, para ordenadores personales, y el UNIX y VMS para los ordenadores medios y grandes. Con mayor frecuencia cada día, el usuario no interacciona directamente con el sistema operativo, sino con un entorno gráfico que facilita la administración de los recursos de la máquina. En el mundo de la informática personal, éste es el papel que ha cumplido el entorno Windows de Microsoft, que no es propiamente un sistema operativo, sino sólo un gestor gráfico, aunque permite ampliar algunas limitaciones del MS-DOS. Los nuevos productos Windows NT y Windows 95 sí pueden propiamente considerarse como sistemas operativos, ya que implican una gestión completa de los recursos de la máquina. En lo que a estaciones de trabajo se refiere, el entorno gráfico más utilizado es el XWindows Motif.

Los programas de aplicación utilizan los recursos del sistema operativo para comunicarse con el ordenador. Como es bien sabido, el ordenador sólo es capaz de procesar caracteres binarios, por lo que toda instrucción que el usuario pretenda ejecutar ha de ser convertida a este código. Esta tediosa labor la ejecutan los compiladores, programas que convierten una serie de instrucciones más o menos

cercanas al lenguaje humano en un código que entienda la máquina. Existen distintos compiladores para cada uno de los lenguajes de programación, y para los sistemas operativos más comunes. Entre los lenguajes más empleados en tratamiento digital de imágenes están el C, FORTRAN, Pascal, Basic y APL, con un dominio claro de los dos primeros.

Una vez escritos y compilados, los programas de aplicación están listos para ser ejecutados. Lo habitual será que el usuario disponga de un conjunto de programas de aplicación, que abarquen las operaciones más destacadas en tratamiento digital de imágenes, y sólo tenga que diseñar sus propios programas para satisfacer necesidades muy particulares de la investigación. Estos nuevos desarrollos se facilitan gracias a disponer de librerías de programas, formadas por utilidades de uso común (lectura de una imagen, filtro, obtención de coordenadas, etc.). En los paquetes más recientes, los programas de tratamiento se ejecutan mediante un sistema de menús. Esto quiere decir que las distintas opciones que ofrece se acoplan a un programa director, desde el que se seleccionan, lo cual permite un diálogo más interactivo con el usuario del equipo (fig. 6.9). Estos

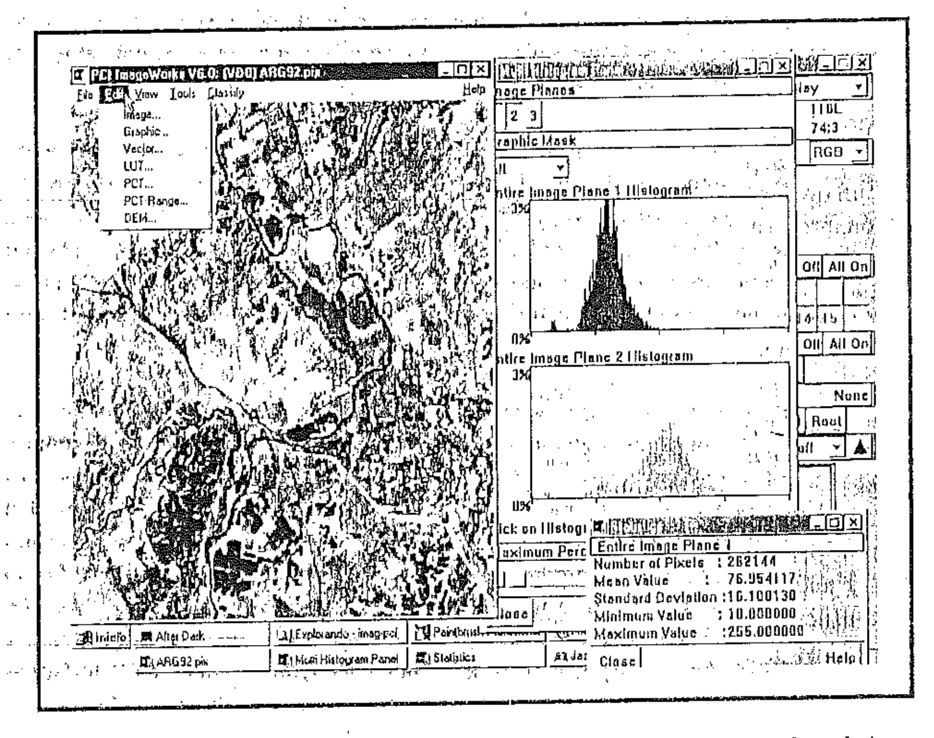


Fig. 6.9 - *Comunicación con el usuario en el entorno Windows. Pueden abrirse simultáneamente varias ventanas, y las opciones de los distintos programas se activan con menús desplegables.*

programas de aplicación suelen disponer de un lenguaje propio para desarrollar aplicaciones específicas. Lo más habitual es ofrecer un lenguaje algebraico, que facilite introducir modelos diseñados por el usuario (correcciones atmosféricas, transformaciones de la imagen). También permiten simplificar algunas tareas repetitivas mediante la generación de archivos "macro", que ejecutan varias tareas del programa en el orden y con los parámetros indicados por el usuario.

6.3.3. Equipos de tratamiento digital

En algunos casos, un equipo de tratamiento digital de imágenes es un sistema cerrado. Quiere esto decir que hardware y software se integran en una serie de componentes bien estructurados para la resolución de una serie de aplicaciones. Se denominan, en tono informal, sistemas llave en mano, puesto que no requieren un conocimiento informático muy extenso para poder abordar las principales aplicaciones. Estos sistemas ofrecen normalmente una estructura modular, de tal forma que el usuario puede adquirir una configuración básica y añadir en el futuro distintas opciones, tanto de programas como de periféricos. En otras ocasiones, los programas de tratamiento digital se adaptan a entornos más abiertos, donde conviven con otras aplicaciones.

Simplificando mucho las cosas, podemos dividir los equipos de tratamiento digital de imágenes en el mercado en tres categorías: (i) básicos, soportados por un ordenador personal, (ii) avanzados sobre ordenador personal, y (iii) soportados por un ordenador medio o grande. Las posibilidades de estos tres grupos están en razón directa a su coste, por lo que, en función de las necesidades y del presupuesto disponible, será el usuario final el que juzgue la conveniencia de una u otra opción.[2]

Previo al estudio de los sistemas más representativos, conviene aclarar que no existe un criterio absoluto para abordar la elección entre un sistema y otro. En otras palabras, para evaluar un equipo de tratamiento digital de imágenes habrá que pensar en todo momento en la aplicación a la que se destina. Un usuario con interés en aplicaciones geológicas valorará la capacidad de visualización del equipo, así como las transformaciones y realces que ofrezca. Por el contrario, un interesado en cartografía de la vegetación o de la cubierta del suelo, estará más atento a los algoritmos de clasificación que incorpora. Para uno y otro usuario, sin embargo, convendrá tener en cuenta algunas características generales:

[2] En Jensen (1996, pp. 69-71) se incluye un análisis de los equipos de tratamiento digital de imágenes más comunes en el mercado. Aunque algo desfasado ya, puede también consultarse el análisis de Chuvieco (1992c) sobre programas de ámbito docente.

– Calidad del *hardware* en relación con el coste. Potencia del ordenador central, capacidad de almacenamiento, resolución del sistema de visualización, periféricos disponibles para futuras expansiones.

– Rapidez de proceso, en función de los componentes físicos, pero también del lenguaje de programación y de la estructura de los algoritmos empleados. Convendrá anotar los tiempos empleados en realizar operaciones comunes, como sería filtrar o clasificar una ventana de la imagen.

– Diálogo con el usuario. La mayor parte de los equipos más recientes mejoran notablemente la facilidad de manejo, incorporando un sistema de menús y una serie de instrucciones de ayuda en directo al usuario. Convendrá tener en cuenta este aspecto de cara a obtener resultados en el menor tiempo posible.

– Capacidades de exportación/importación de archivos, tipo de formatos a los que accede para lectura o escritura, con especial interés de aquellos más estándar, como los *Tagged Image Format* (TIF) o los *Encapsulated Postcript* (EPS) que son bastante comunes a múltiples programas.

– Capacidades de programación. Un usuario novicio normalmente no necesitará ampliar las posibilidades del sistema. Sin embargo, cuando se pretende abordar un proyecto más específico o una tarea de investigación será habitual redactar programas propios para obtener la finalidad pretendida. Con esta finalidad, conviene considerar si el programa ofrece herramientas para diseñar nuestros propios modelos de tratamiento.

De acuerdo a la tipología antes establecida, comentaremos las características más destacadas de los equipos de tratamiento digital de imágenes actualmente en el mercado (tabla 6.1).

6.3.3.1. Equipos básicos

En el rango inferior de la escala estarían los equipos basados exclusivamente en un ordenador personal. Se recomienda un equipo basado sobre un micro-procesador 80486 o Pentium, con una tarjeta gráfica SVGA (1 Mb) y un monitor de color de media o alta resolución (1024 x 1010 píxeles x 256 colores), preferiblemente de 15 pulgadas. Deberían equiparse con mínimo de 8 Mb de RAM y 540 Mb de disco. Son sistemas idóneos para la enseñanza introductoria, pues, además de su bajo coste, proporcionan la mayor parte de las operaciones elementales: visualización, realce y clasificación de la imagen. Asimismo, ofrecen copias en papel de las imágenes tratadas, gracias a aprovechar las posibilidades gráficas de una impresora de inyección de tinta o láser de bajo coste.

Componente	Equipo básico	Equipo avanzado sobre un ordenador personal	Equipo soportado por una estación de trabajo
Procesador	80486 - Pentium 100 Mhz	Pentium 75 - 166 Mhz	Estación trabajo RISC
Memoria mínima	8 Mb	16 Mb	32 Mb
Disco recomendable	540 Mb	1 - 1,6 Gb	4 - 5 Gb
Tarjeta gráfica	1 - 2 Mb	2 - 4 Mb	2 - 4 Mb
Monitor	14 - 15 pulgadas	17 - 19 pulgadas	17-19 pulgadas
Salida gráfica	Inyección tinta	Filmadora Sublimación de color	Trazador electrostático Trazador de tinta
Sistema operativo	MS-DOS/Windows	Windows NT - 95	Unix
Software aplicación	Idrisi - Dragon	ERDAS, ERMapper, PCI, TNT	ERDAS, ERMapper, PCI, TNT

Tabla 6.1 - *Componentes habituales de los distintos equipos de tratamiento digital*

Entre los programas de bajo coste que aprovechan adecuadamente estos recursos y resultan idóneos para la enseñanza de la teledetección (Chuvieco, 1992c), cabe citar por su versatilidad los programas DRAGON™ (Goldin y Rudahl, 1994) e IDRISI (Eastman, 1993). El rango de operaciones que incluyen ambos programas abarcan las más habituales en tratamiento digital: visualización de imágenes, filtrajes, combinaciones lineales entre bandas y clasificación, supervisada y no supervisada. La salida gráfica puede realizarse con impresoras matriciales, láser y de inyección de tinta. La versión actual de DRAGON, debido a las limitaciones de la memoria gráfica, sólo permite clasificar con un máximo de 16 categorías y 4 bandas. El programa se completa con una serie de utilidades para acceder a imágenes adquiridas en otros formatos, así como exportar los resultados de la clasificación a programas de cartografía digital de bajo coste. En consecuencia, resulta idóneo para un ámbito docente. Por su parte, IDRISI es un conjunto completo de programas que gestionan información geográfica (ver cap. 9), siendo el tratamiento digital una pequeña parte dentro de ese marco. La última versión, adaptada al entorno gráfico Windows 3.1 y Windows 95, mejora notablemente las capacidades de visualización de imágenes, y, gracias a su inmediata relación con información auxiliar en un SIG, resulta muy adecuado para el ámbito docente.

6.3.3.2. Equipos avanzados sobre ordenador personal

El escalón siguiente está ocupado por aquellos equipos que se apoyan en un ordenador personal, pero que mejoran notablemente la configuración estándar del *hardware*. La configuración ideal sería un microprocesador Pentium a 166 MHz, con 32 Mb de RAM, disco de 2 Gb, una tarjeta gráfica de 4 Mb y un monitor de 17 pulgadas de alta resolución. Conviene también incorporar algún sistema para almacenamiento de seguridad (cintas .DAT, por ejemplo) y algún disco magneto-óptico en caso de que vaya a ser requerido por varios usuarios. Lo habitual es que estos equipos se apoyen en sistemas operativos más potentes que el MS-DOS, como son el Windows NT o Windows 95, que permiten aprovechar más adecuadamente los recursos físicos de la máquina, admiten múltiples ventanas de trabajo y tienen capacidad multitarea y multiusuario. Los programas de gestión son muy similares a los encontrados para estación de trabajo, incluyendo todas las operaciones de realce y corrección más habituales, distintas estrategias de clasificación y soportan una buena gama de periféricos gráficos (fig. 6.10).

Pese a las mejoras en la informática personal, estos equipos todavía resultan algo más lentos y limitados que las estaciones de trabajo, lo que restringe su empleo en trabajos de producción. Son, sin embargo, idóneos para la enseñanza superior y para múltiples actividades de investigación, por lo que resultan idóneos para un pequeño departamento universitario.

Entre los equipos de estas características, el que cuenta con una mayor difusión internacional es el sistema *ERDAS Imagine*. Posee versiones para orde-

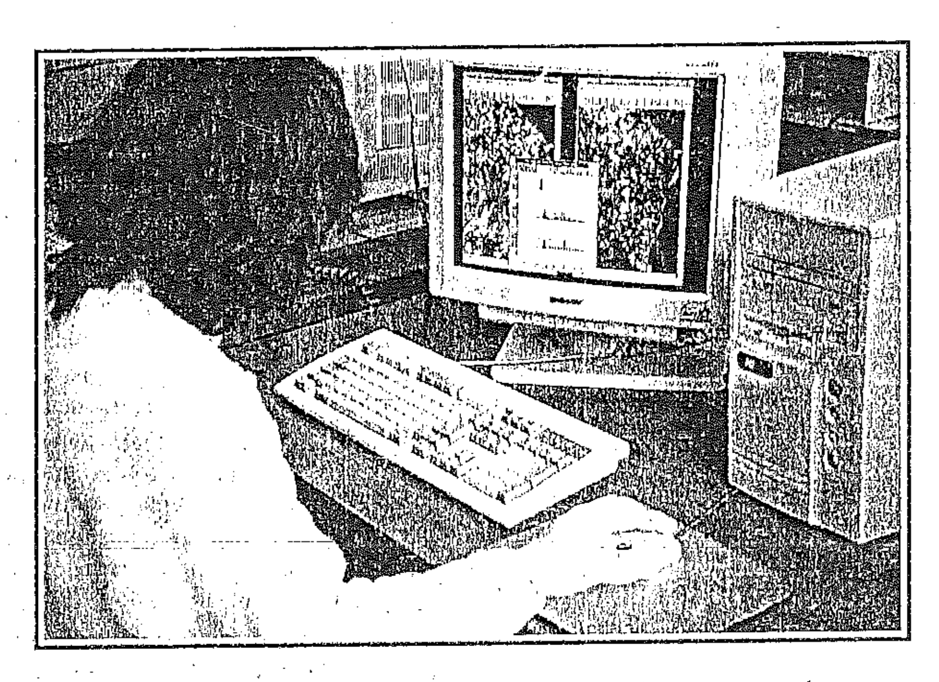


Fig. 6.10 - *Equipo de tratamiento digital de imágenes soportado por un ordenador personal de altas prestaciones*

nadores mini y estaciones de trabajo (Sun, Prime, Micro-Vax, etc.), empleando VMS o UNIX como sistemas operativos. En lo que se refiere a la versión para Windows NT, ERDAS ofrece prácticamente las mismas operaciones que en las versiones para estación de trabajo.

Junto a este sistema, existe una amplia gama de equipos en el mercado con éstas o similares características. Sus costes y prestaciones tienden a una cierta homogeneización, aunque algunos resultan más generosos en la promoción del producto, como es el caso de *ER-Mapper* y *PCI*, con una admirable política de promoción educativa. Ambos programas cuentan con una amplia gama de posibilidades. El primero ofrece un entorno bastante original, basado sobre la creación de algoritmos virtuales, mientras el segundo cuenta con herramientas de análisis muy novedosas, no presentes en otros paquetes, como sería el análisis de redes o la clasificación borrosa, que tendremos ocasión de comentar en el capítulo 7.

6.3.3.3. Equipos soportados por una estación de trabajo

El escalón superior en los equipos de tratamiento está constituido por aquellos sistemas conectados a un mini-ordenador o estación de trabajo. Las firmas comerciales más conocidas en este tipo de *hardware* son Sun, Hewlett Packard, Silicon Graphics y Digital Equipment, sin olvidar a IBM y Prime. Estos equipos ofrecen mayor rapidez y capacidad de almacenamiento que los ordenadores personales. Se apoyan principalmente en el sistema operativo UNIX en un entorno X Windows, lo que les permite realizar a la vez diversas tareas, y ser accedidos por varios usuarios simultáneamente. Pueden trabajar sobre extensas superficies, con un rango de visualización entre 512 x 512 píxeles y 2048 x 2048 píxeles. Los costes de estos equipos son todavía muy superiores a los incluidos en el epígrafe anterior, especialmente en lo que se refiere al *hardware* básico y a los periféricos. Asimismo, el coste del *software* es mayor que el disponible para los sistemas operativos *Windows NT o Windows 95.*

Los programas disponibles son relativamente similares a las versiones para Windows (normalmente la versión UNIX precede a la Windows), y así se pretende promocionar por las empresas propietarias, ya que son conscientes de la necesidad de integrar ambas plataformas. ERDAS, ER-Mapper y PCI son los sistemas más conocidos. Junto a éstos, existen también varios paquetes de programas denominados «de dominio público», que han sido diseñados por distintos organismos oficiales de Estados Unidos, lo que permite su adquisición por cantidades simbólicas. Entre ellos, destacan por su calidad técnica y amplia extensión, los programas VICAR y ELAS, ambos realizados en distintos centros de la NASA, y el programa GRASS, diseñado inicialmente por el *U.S.Army Corp of Engineers.*

Todos los sistemas basados en estaciones de trabajo, cuentan con el rango completo de algoritmos de tratamiento, algunos de los cuales aún no están disponibles para ordenadores personales por tratarse de operaciones que requieren gran capacidad de cálculo. Este es el caso de la generación de modelos digitales del terreno a partir de pares estereoscópicos (la denominada fotogrametría informática: *soft photogrammetry*)

Gracias a una reciente encuesta realizada por el programa UNEP-GRID de Naciones Unidas a las empresas más importantes del mundo que desarrollan programas de análisis de imágenes en teledetección y S.I.G. (vanderZee y Singh, 1995), podemos extraer algunas directrices sobre las tendencias del desarrollo de estos equipos. Entre ellas, las más destacadas serían: (i) un aumento de las instalaciones, aproximadamente se duplican los sistemas instalados entre 1991 y 1993 (se cifra un total, para ese año, de más de 91.000 sistemas); (ii) una cierta maduración de los sistemas instalados, ya que no crece el número de nuevos programas; (iii) las dos terceras partes de los sistemas vendidos pueden denominarse de «llave en mano», esto es, incluyen componentes físicos y lógicos; (iv) el sistema operativo MS-DOS sigue liderando el sector, con el 45 % de las licencias instaladas, seguido del UNIX, con el 40 %; (v) tendencia hacia entornos gráficos y programación en C; (vi) tendencia a mejorar la atención al usuario, ya que el 90 % poseen ayuda en línea y el 85 % cuentan con asistencia técnica directa (de ellos, el 100 % en inglés, sólo el 10 % en francés y el resto de los idiomas apenas tiene representación).

6.4. Operaciones de utilidad general

Una vez repasados algunos conceptos introductorios, se inicia ahora el estudio de las operaciones más comunes en tratamiento digital de imágenes, siempre en el contexto de las aplicaciones de la teledetección espacial.

A lo largo de este capítulo utilizaremos tres imágenes adquiridas por los sensores NOAA-AVHRR y Landsat-TM. Se trata de un sector del litoral mediterráneo, cercano a la ciudad de Valencia (imagen Buñol), de una zona inmediata a la ciudad de Madrid (imagen Madrid) y de una parte del valle del Jarama, cercano a la ciudad de Arganda del Rey (imagen de Arganda). El área cubierta por estas imágenes se localiza en la figura 6.11. Se adquirieron en julio-agosto de 1991 (la de Buñol) y julio de 1992 (las de Madrid y Arganda). De las tres se dispone de imágenes de otras fechas para el análisis multi-temporal (cap. 7.3). En el caso de la primera, contamos con una serie de 20 imágenes adquiridas en julio y agosto de 1991, y de las dos restantes se dispone de una imagen adquirida en agosto de 1984, ocho años previa a la aquí comentada.

Los procesos aplicados sobre esta imagen se basan en varios programas de tratamiento digital de imágenes disponibles en nuestro departamento: ERDAS Imagine 8.2 (versión Windows NT), ER-Mapper, IDRISI y, sobre todo, PCI. Estos

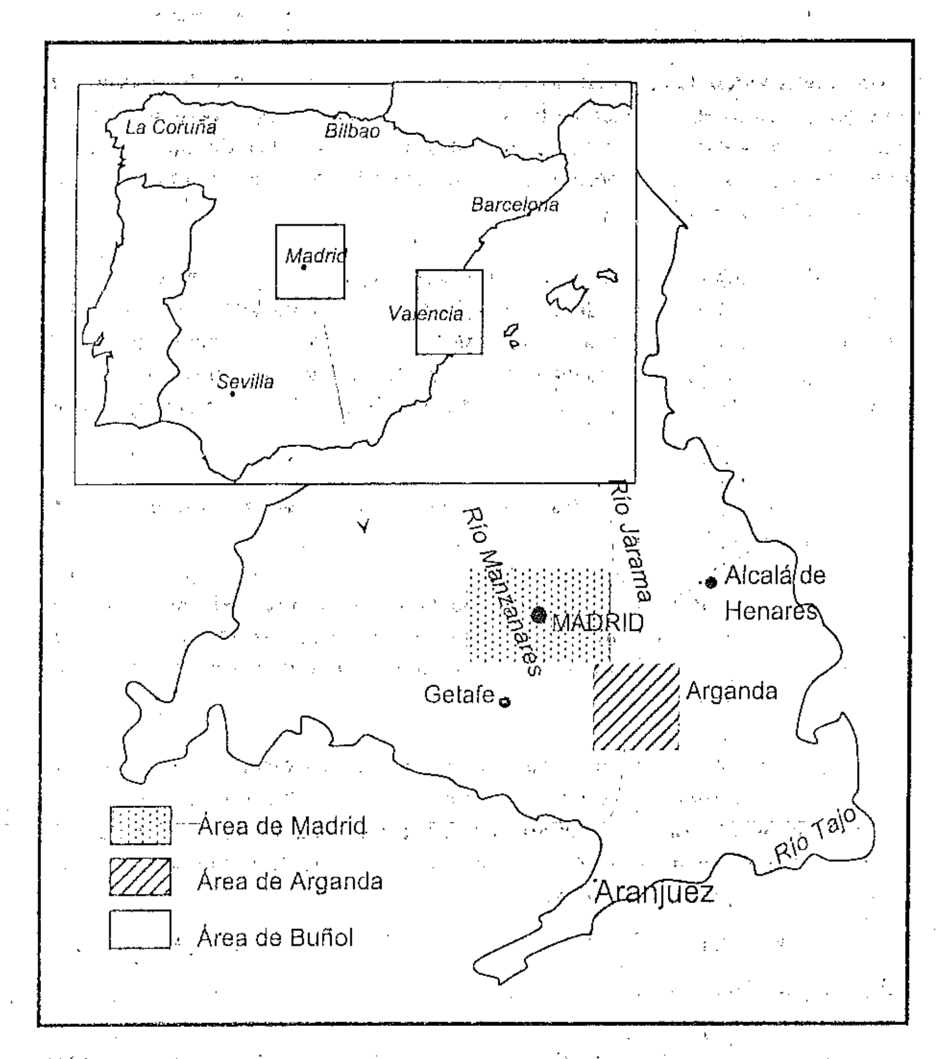


Fig. 6.11 - *Localización de las imágenes utilizadas como ejemplo*

programas se ejecutan en ordenadores personales con procesador Pentium, tarjetas gráficas de 2 y 4 Mb, monitores de 17 y 19 pulgadas, memoria central de 32 Mb y memoria en disco de 2 a 4 Gb. Como terminales gráficos se emplean impresoras láser y de inyección de tinta, y una filmadora Polaroid C-5000 (resolución de 4096 x 2048 píxeles con película de 35 mm), si bien la mayor parte de las figuras de esta obra se han incluido en formato digital, para su maquetación directa. Esta descripción no implica, como es lógico, que las operaciones incluidas en el texto sean exclusivas del equipo de tratamiento utilizado. Obvia decir que el empleo de estos equipos no implica un menosprecio hacia otros, sino sólo un aprovechamiento de los recursos disponibles en nuestro departamento.

Se inicia el examen de las técnicas de tratamiento digital con procesos que hemos calificado de utilidad general, por cuanto pueden aplicarse a diversas finalidades y sirven de escalón intermedio para otras operaciones más específicas. Se incluyen en este apartado aquellas actividades que se relacionan con la manipulación de archivos, cálculo de estadísticas sobre la imagen y visualización.

6.4.1. Gestión de archivos

Cualquier sistema de tratamiento de imágenes incluye una serie de utilidades generales que le permiten gestionar apropiadamente los archivos donde se alojan las imágenes, polígonos auxiliares y tablas de color, así como las distintas transformaciones que sobre ellas se apliquen. Las más elementales son los comandos propios del sistema operativo, como copiar, cambiar el nombre o eliminar archivos.

Entre las más específicas del tratamiento digital, la primera en orden cronológico es la lectura de los datos originales. Esta operación implica contar con un programa que importe los datos en el soporte y formato proporcionados por el organismo distribuidor de las imágenes. Lo ideal es que permita leer la información almacenada en las cabeceras de cada archivo, con objeto de poder importar automáticamente los datos referentes al tamaño de la imagen, condiciones de adquisición y de calibración del sensor. También resulta muy adecuado que el programa nos ofrezca la opción de leer una pequeña ventana de la imagen (que incluya el área de interés), extrayendo los ND correspondientes a las bandas originales sobre las que se pretenda trabajar.

Esa labor se facilita si el programa de lectura de imagen incorpora alguna rutina para la visualización del área designada, lo que permite una localización interactiva de las coordenadas inicial y final de esa ventana, agilizando bastante el proceso de búsqueda. Si no se conoce aproximadamente la localización de esa ventana en la imagen, resulta conveniente contar con alguna opción para leer la imagen con un factor de reducción, lo que permite visualizar una superficie mayor a la que admitiría la resolución de la pantalla. Esto implica, en definitiva, un muestreo sistemático de la imagen, eligiendo una columna y línea de cada n, siendo n el factor de reducción. Una vez localizada el área de interés sobre esa zona más amplia, puede accederse a aquélla con la plena resolución de la imagen (píxel a píxel).

Una vez leídos los datos, el programa necesita generar una serie de campos para la documentación de la imagen, que le permitirán gestionar posteriormente su visualización y análisis. Para reconocer apropiadamente un archivo de imagen, cualquier programa necesita saber sus dimensiones (número de líneas y columnas), las coordenadas de sus vértices, el tamaño del píxel en x e y, el número de bandas,

número de bits por píxel, y las estadísticas elementales. En algunos programas esa información se asocia permanentemente a la imagen, ocupando los primeros bytes del archivo; en otros, se almacena en un archivo auxiliar, con el mismo nombre de la imagen original. Esto facilita la lectura de la imagen por otros programas, ya que todos los datos del archivo de imagen contienen datos adquiridos por el sensor y no información auxiliar. También en función del programa de tratamiento elegido, los datos pueden presentarse en formato BSQ o BIL. En el primer caso, cada banda ocupa un archivo distinto, mientras en el segundo todas las bandas se incluyen en el mismo. Esta segunda opción agiliza el cálculo cuando se trata de generar combinaciones entre bandas de la misma imagen, pero lo dificulta si se pretende relacionar información de dos imágenes.

Otra utilidad habitual en los equipos de tratamiento digital de imágenes permite generar una composición de dos o más imágenes, obteniendo una mezcla de información interesante para la representación visual. Basta que un programa sea capaz de leer una imagen o banda y escribir su contenido en aquellas coordenadas de una nueva imagen que le indique el usuario. Por ejemplo, en la figura 6.12 aparece una composición de cuatro bandas correspondientes a una imagen de Madrid. La posibilidad de verlas simultáneamente nos ayuda a interpretar la diversa información espectral que contiene cada una de las bandas originales. Así, las bandas visibles (azul y rojo) presentan un aspecto muy similar, con escasas variaciones tonales. Sin embargo, la banda 4 (infrarrojo cercano) y 5 (medio) presentan un aspecto más específico. En el primer caso, a consecuencia de la

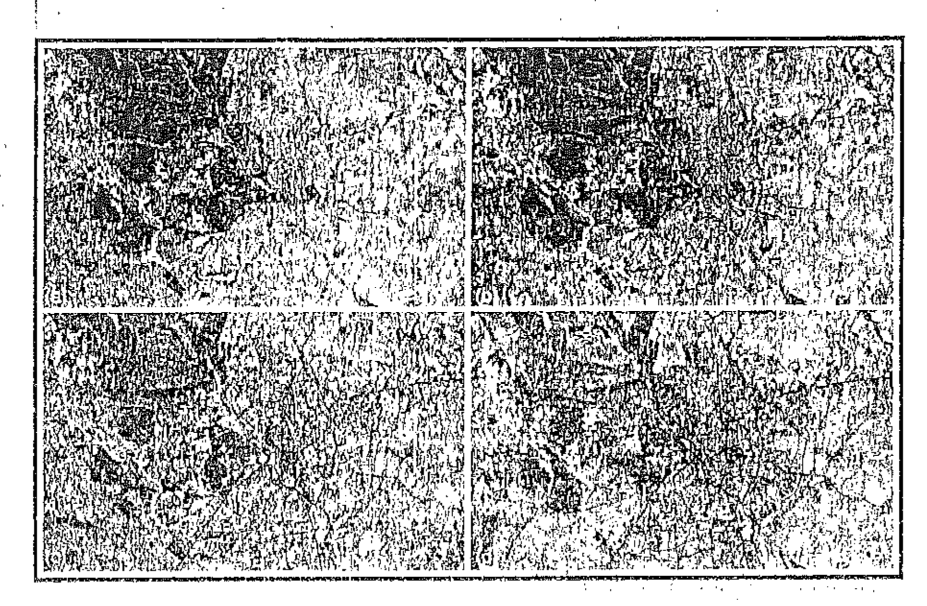


Fig. 6.12 - *Composición multibanda sobre la imagen de Madrid: (a) banda 1, (b) banda 3, (c) banda 4, (d) banda 5.*

mayor reflectividad de la vegetación, como puede verse en el caso del parque del retiro (en el centro de la mancha urbana de Madrid) y los campos de golf situados en su vertiente nororiental; en el segundo, debido a la observación más nítida del contenido de humedad, que permite distinguir entre los sectores orientales y occidentales del Monte del Pardo.

Otra utilidad de interés en ciertas aplicaciones es aislar un sector de la imagen, definido por un polígono irregular, que sirve para aislar determinadas zonas de la imagen de cara a un tratamiento específico. Por ejemplo, puede restringirse el análisis a un área incluida en algún límite administrativo o lindes de cuencas hidrográficas. El trabajo con sectores irregulares de la imagen implica los siguientes procesos:

(i) Delimitar los límites de ese polígono, con ayuda de un digitizador, cursor, o ratón electrónico.

(ii) Aplicar ese polígono a la imagen original, aislando todos aquellos píxeles que se sitúen en el interior de dicho polígono de los que se encuentren fuera. Estos últimos pasarán a tener un ND de 0, por lo que son eliminados de posteriores tratamientos.

La figura 6.13 ilustra la realización de este proceso para la imagen de Madrid. Sobre la composición en falso color, se delimitó el centro urbano, con la ayuda del ratón electrónico. Posteriormente se aplicó ese polígono a la banda 3 de la misma imagen, aislándose el componente urbano, tal y como se interpretó visualmente, del resto de la escena.

6.4.2. Utilidades para la visualización

La capacidad para la visualización de la imagen debe considerarse como una de las principales características de un equipo de tratamiento digital. Esa capacidad es dependiente del *hardware* disponible (6.3.1.3), y de las herramientas que ofrece el sistema para «dialogar» con el monitor gráfico. La relación, en este

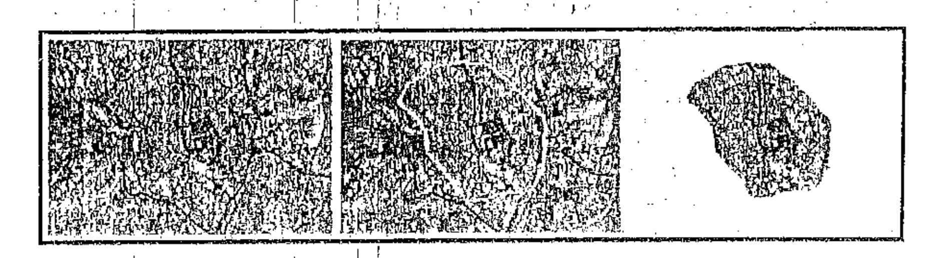


Fig. 6.13 - *Proceso para aislar la zona urbana de Madrid mediante una máscara*

sentido, sería muy amplia, puesto que una de las tendencias de mayor desarrollo, en el momento presente, tiende precisamente a construir sistemas mucho más interactivos con el usuario.

En lo que se refiere al ámbito que nos ocupa, las utilidades de visualización más habituales son:

(i) Conversión digital-analógica de los ND almacenados en la imagen, lo que permite su representación en el monitor gráfico. El proceso técnico aplicado puede estudiarse en otros publicaciones (Richards, 1993, apéndice F; Muller, 1988). Basta aquí indicar que supone convertir un valor numérico (el Nivel Digital o Visual de cada píxel) en una señal analógica que se trasmite a un tubo de rayos catódicos (CRT) para su representación visual. Con objeto de que la imagen visualizada se mantenga en el monitor, existe un dispositivo intermedio, denominado memoria gráfica o de refresco (*refresh buffer*), que almacena temporalmente los ND visualizados hasta que se envíe una nueva imagen al monitor. A partir de esa memoria intermedia, se produce un barrido del tubo de imagen, a un ritmo de 25 ó 30 veces por segundo, suficientemente alto para que no pueda apreciarse por el ojo humano. Lo más habitual es que se cuente con tres memorias de refresco, una para cada uno de los tres colores elementales (rojo, verde y azul), gracias a lo que pueden visualizarse tres bandas simultáneamente.

(ii) Obtención de coordenadas. Con ayuda del digitizador o del ratón electrónico, pueden conocerse las coordenadas de distintos puntos de interés, de cara a la corrección geométrica de la imagen (6.5.3) o a la caracterización espectral de distintas cubiertas (7.1). La localización se facilita por la ayuda de un cursor gráfico, normalmente en forma de cruz o de flecha.

(iii) Digitización de áreas sobre la imagen, realizada —al igual que en el caso anterior—con la ayuda de un cursor móvil. Estas zonas pueden hacerse corresponder con áreas de entrenamiento para la clasificación (7.2.2), con elementos lineales para anotar los resultados (carreteras o ríos), o con sectores que pretenden aislarse de la imagen (máscaras). En similares términos cabe expresarse en lo que hace referencia a la inclusión de rótulos o simbología gráfica (encabezamientos, flechas de orientación, líneas, retícula U.T.M., etc.), de interés para la presentación cartográfica de los resultados (7.2.4).

(iv) Cambios de escala, esta operación se dirige a ampliar o reducir la imagen visualizada para verla con mayor o menor detalle, respectivamente. Este proceso se realiza en la memoria de refresco, por lo que se obtiene casi instantáneamente, facilitando la interactividad con el intérprete. Además de aumentar el tamaño del píxel, el usuario puede desplazarse sobre la imagen a esa nueva escala (*pan, roll*), facilitando notablemente la localización de zonas de interés. Una ampliación de mayor calidad visual puede lograrse mediante un zoom

interpolado. Aquí, en lugar de una simple réplica de los ND originales, se crea una nueva matriz de tamaño equivalente al nivel de magnificación. En esta matriz se sitúan los ND originales, y se calculan los otros por interpolación lineal de estos valores. La impresión que causa sobre la pantalla es la de una imagen mucho más nítida, puesto que mantiene una mejor transición entre píxeles vecinos.

(v) Creación de archivos de visualización. En muchas ocasiones resulta muy conveniente contar con una copia de la información almacenada en el monitor. Esto se consigue gracias a un programa auxiliar que salva la memoria de refresco en el disco, generando una nueva imagen que puede visualizarse posteriormente. Por ejemplo, un mosaico de cuatro bandas puede realizarse, además de mediante extracción de los 4 archivos y generación de uno nuevo, mediante una composición interactiva en el monitor. Gracias a ello, pueden visualizarse un conjunto de imágenes y/o elementos gráficos asociados, sin necesidad de repetir todo el proceso que llevó a su creación. Conviene tener en cuenta, sin embargo, que en este caso la precisión de los datos depende de la resolución de la memoria gráfica (en ocasiones la imagen tendrá que comprimirse para que puedan visualizarse varias bandas simultáneamente), mientras con la creación de un archivo compuesto se mantiene la resolución original de los datos.

6.4.3. Cálculo de estadísticas e histograma de la imagen

Ya hemos indicado que cualquier operación aplicada sobre la imagen parte de comprender su carácter digital. Al igual que cualquier variable estadística, la operación más elemental que podemos realizar con una imagen es describir su tendencia central y dispersión. En otras palabras, conocer cuál es la tendencia general de la radiancia detectada en cada banda, y qué nivel de homogeneidad existe entre los píxeles que la componen. Para ello, cualquier programa de tratamiento digital de imágenes facilita el cálculo de las estadísticas elementales de la imagen, al menos de las medidas de tendencia central y dispersión más habituales. Recordando aspectos de estadística descriptiva, la media puede definirse como:

$$\overline{ND_k} = \frac{\sum_{i=1,n} ND_{i,k}}{n_k} \qquad [6.1]$$

para las k bandas que forman la imagen, y los n píxeles que la componen, y la desviación típica como:

$$s_k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1,n}\left(ND_{i,k} - \overline{ND_k}\right)^2}{n_k}} \qquad [6.2]$$

Estas medidas nos ofrecen una primera valoración sobre el carácter de cada una de las bandas y su grado de homogeneidad. Las correspondientes a la imagen de Madrid aparecen en la tabla 6.2.

De esta tabla se deduce que la banda 1 ofrece —entre las ópticas— el mayor desplazamiento de sus ND mínimos, lo que puede ser consecuencia del efecto de dispersión atmosférica[3]. Los ND medios son más altos para esa banda, junto a la 5, bastante saturada a juzgar por los valores mínimo y máximo, muy próximos a 0 y 255, respectivamente. La banda 5 acoge también la mayor heterogeneidad, con una desviación típica de 31,63 ND. Por su parte, la banda 2 ofrece la menor dispersión, con una desviación típica de 10,57 ND y un rango de 125 ND. Lógicamente, estos valores numéricos se relacionan con los parámetros de calibración del sensor. Como resulta evidente, la banda 5 es la más sensible a alteraciones de radiancia, mientras la 2 ofrece el peor contraste en la escena.

Además de estos valores medios, también resulta de gran interés contar con el histograma de frecuencias de cada banda, que nos informa sobre cómo se distribuyen los ND en una determinada imagen. Con objeto de facilitar la representación del histograma, las frecuencias absolutas suelen convertirse a relativas, de acuerdo a una sencilla fórmula:

$$FR(ND_i) = \frac{F(ND_i)}{\Sigma \{F(ND_i)\}} = 100 \qquad [6.3]$$

Esto es, la frecuencia relativa de un determinado ND (p.ej. el valor 123) se calcula como el cociente entre el número de píxeles que presentan ese valor y el total de píxeles de la imagen. Esa proporción sirve para escalar el histograma, a partir de la frecuencia relativa mayor.

	Máximo	Mínimo	Media	Desv. Típica
Banda 1	255	70	102,19	15,81
Banda 2	154	29	50,43	10,57
Banda 3	187	26	62,54	16,59
Banda 4	175	18	69,62	12,84
Banda 5	255	13	120,53	31,63
Banda 7	255	5	62,59	17,94

Tabla 6.2 - *Estadísticas elementales de la imagen de Madrid*

[3] Recuérdese, de 2.8.2. que la dispersión Rayleigh, la más común, afecta principalmente a las longitudes de onda más cortas.

Varios autores han puesto de relieve el interés del histograma para realizar una primera valoración de la imagen (Jensen, 1996; Richards, 1993). Su localización nos permite deducir la tonalidad dominante de cada banda; su anchura está relacionada con el contraste, mientras la presencia de picos relativos puede ser testigo de determinadas clases de cobertura. Por ejemplo, para el caso de la imagen de Madrid, los histogramas de las bandas 1, 3 y 5 (fig. 6.14) nos permiten realizar algunos comentarios interesantes. Por un lado, todos ellos ocupan sólo un pequeño margen del rango de variación ofrecido por el sensor, o, si se prefiere, por el equipo

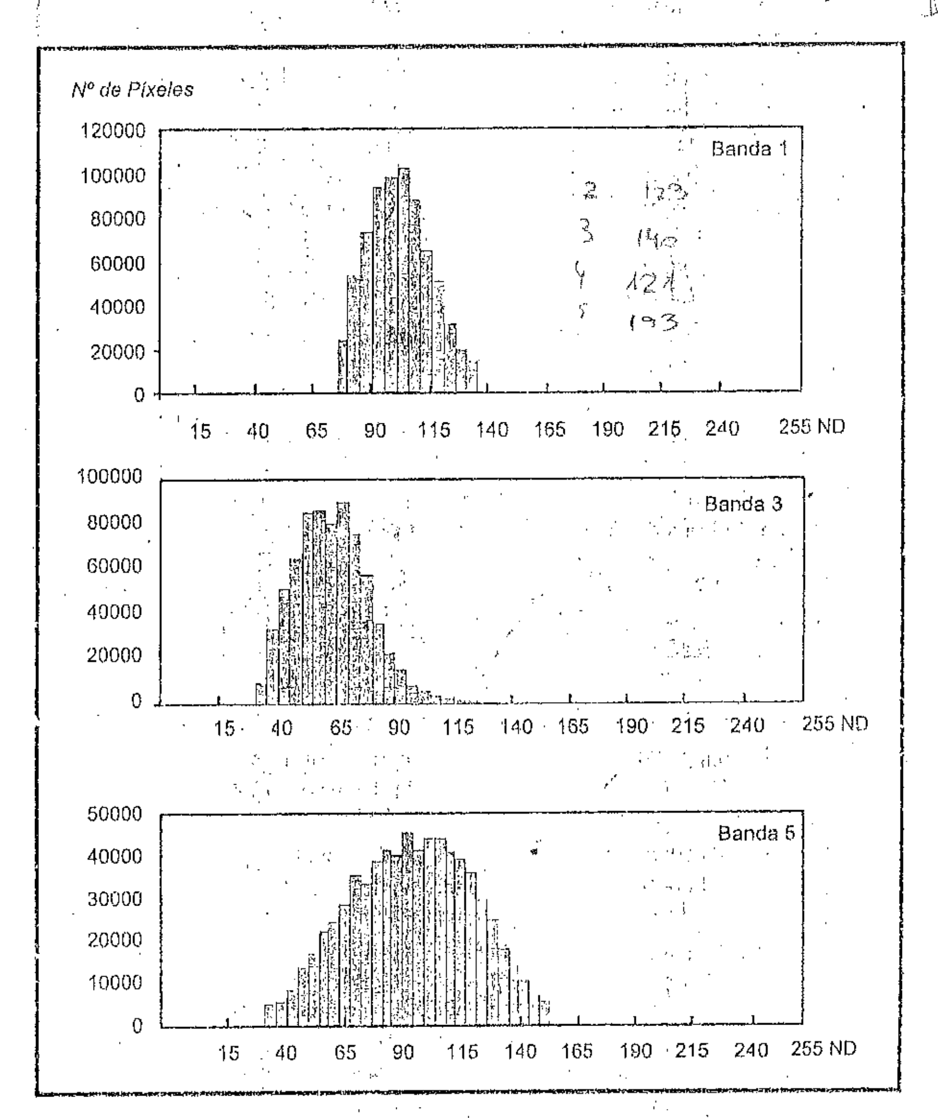


Fig. 6.14 - *Histograma de las bandas 1, 3 y 5 de la imagen de Madrid*

de visualización (0 a 255). Esto implica la conveniencia de ajustar, de alguna forma, la variación inicial a la máxima permitida, lo que supondrá una mejora del contraste (ver 6.6). Entre las bandas aquí incluidas, la 5 se confirma como la que ofrece mayor dispersión (recuérdese que posee la desviación típica más alta), mientras la 1 presenta un histograma más estrecho. En cuanto al significado de los distintos picos de frecuencia, resulta muy complicado identificar las cubiertas que los originan.

Además de la consideración de cada banda por separado, también resulta de interés tener en cuenta las relaciones entre bandas, con objeto de analizar el grado de información original que aporta cada una. Este análisis puede realizarse gráficamente, mediante la construcción de dispersogramas, que presentan en un gráfico bivariado la localización de los píxeles de la imagen a partir de sus ND en dos bandas (fig. 6.15). Cuando la nube de puntos en estos gráficos tiendan a formar una línea (o una elipse de ejes muy contrastados), las dos bandas tenderán a estar muy relacionadas. En otras palabras, puede ser suficiente trabajar con una de ellas reteniendo la mayor parte de la información original. Esto ocurre, típicamente, entre las bandas visibles (1, 2 ó 3) o las situadas en el infrarrojo medio (5 y 7). Por el contrario, si la nube de puntos ofrece alta dispersión, la relación entre las bandas será pequeña o, lo que es lo mismo, las dos ofrecen información contrastada y ambas son de interés para el análisis.

Este análisis gráfico se completa con el cálculo de algún índice numérico de la relación entre bandas. Uno de los más empleados es el coeficiente de correlación lineal de Pearson, definido como el cociente entre la covarianza de las dos bandas k y m y el producto de sus desviaciones típicas:

$$r_{k,m} = \frac{\left(\sum_{i=1,n}(ND_{m,i} - \overline{ND}_m)(ND_{k,i} - \overline{ND}_k)\right)/n}{s_k s_m} \qquad [6.4]$$

de sentido análogo a los símbolos incluidos en [6.1] y [6.2]. En este caso, la correlación entre las bandas de la figura 6.15 ofrece un valor alto, como es esperable, entre la 1 y la 3 (r = 0,978), mientras la 3 y la 4 muestran una correlación más discreta (r = 0,793). Cuando la imagen cuenta con una amplia cobertura vegetal, este valor suele ser mucho más bajo, ya que precisamente éstas son las cubiertas que marcan más el contraste entre las bandas visibles y el infrarrojo cercano.

Finalmente, la construcción de perfiles radiométricos supone una sencilla operación estadística que ofrece una información interesante sobre el sentido espectral de cada banda. La técnica parte de digitizar sobre la imagen una línea que recoja las cubiertas que quieren inspeccionarse. En nuestro caso, hemos señalado un perfil que atraviesa el centro histórico de Madrid, desde el lago de la Casa de Campo hasta el parque de Roma (fig. 6.16). Un programa de utilidades permite obtener el ND de los píxeles que atraviesa ese transecto para las bandas de interés,

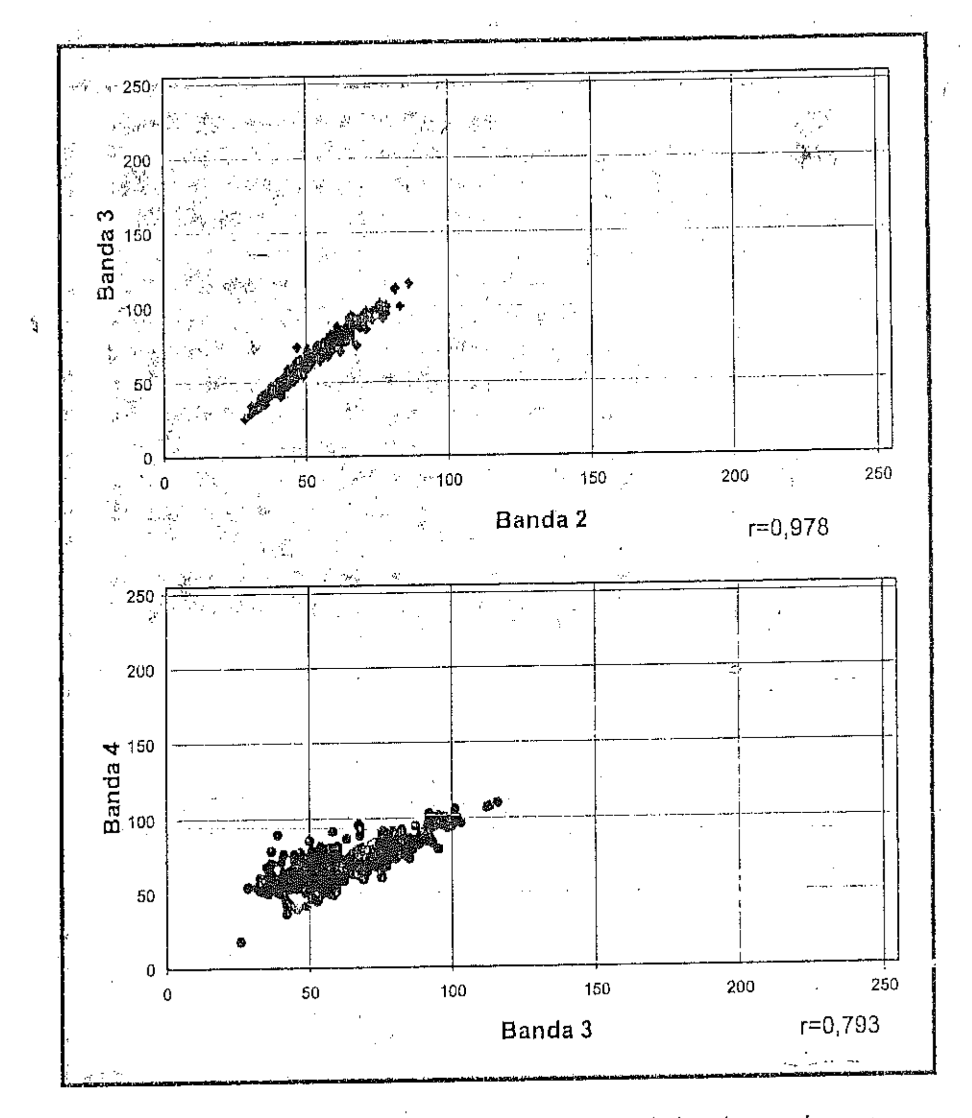


Fig. 6.15 - *Diagramas de dispersión entre pares de bandas: en la parte superior, bandas 2 y 3; en la inferior, las 3 y 4.*

en nuestro caso la 2, 3 y 4. Como puede observarse en el perfil resultante, el trazado de las dos visibles resulta relativamente similar, con tendencia a valores bajos. Sólo aparecen algunos picos coincidentes con superficies altamente reflectantes como la explanada del Palacio Real o la Castellana. Sin embargo, la banda 4 nos ofrece un transecto bastante original, elevándose muy por encima de las visibles al atravesar las zonas cubiertas por vegetación, principalmente los jardines del Moro y el Parque del Retiro. La profunda inflexión cercana al final del recorrido (píxel 148) corresponde al estanque del Retiro.

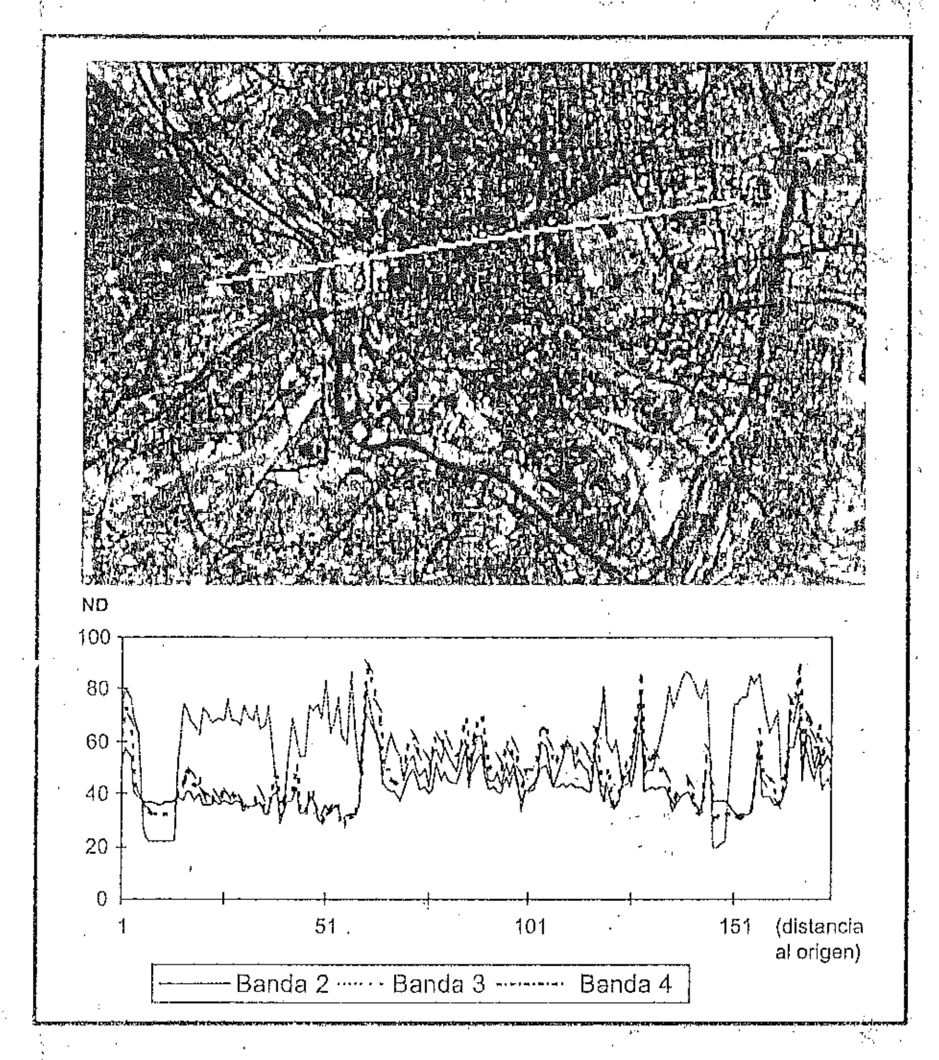


Fig. 6.16 - *Perfiles radiométricos de tres bandas sobre el área urbana de Madrid*

6.5. Correcciones de la imagen

Con este nombre se indican aquellos procesos que tienden a eliminar cualquier anomalía detectada en la imagen, ya sea en su localización, ya en los ND de los píxeles que la componen. Estas operaciones tienden a disponer los datos en la forma más cercana posible a una adquisición idónea, tanto en la posición de los píxeles como en la radiancia que significan.

Algunas de las técnicas tratadas en este capítulo se incorporan de modo rutinario por las estaciones receptoras de las imágenes. Éste es el caso de la red

distribuidora europea EARTHNET, que aplica distintos niveles de corrección radiométrica y geométrica a las imágenes que solicitan los usuarios. En algunas ocasiones, estas correcciones bastarán para abordar un estudio de aplicación, por lo que el usuario puede obviar este capítulo. Sin embargo, en muchos otros casos se precisa abordar correcciones más detalladas. Los estudios multi-temporales, o la entrada de información auxiliar (suelos, vegetación, modelos digitales del terreno), son buenos ejemplos de este tipo de situaciones.

El término corrección, que da título a este epígrafe, conviene manejarlo con ciertos matices, puesto que no todas las operaciones aquí incluidas pueden calificarse propiamente como correcciones de la imagen. Por corrección se entiende solventar algún defecto en la adquisición o recepción de la imagen. Sin embargo, algunos de los tratamientos aquí presentados no se encaminan necesariamente a reconstruir la imagen idealmente detectada, sino más bien a disponerla más adecuadamente para su interpretación. Por ejemplo, la superposición de la imagen a un plano no sólo implica corregir los defectos de adquisición, sino también introducir otros nuevos, ya que cualquier proyección cartográfica deforma la superficie terrestre. Sin embargo, este proceso es necesario si se quiere que los resultados tengan validez cartográfica o se conecten con información auxiliar.

6.5.1. Fuentes de error en una imagen espacial

Cualquier imagen adquirida por un sensor remoto, ya sea aéreo o espacial, presenta una serie de alteraciones radiométricas y geométricas debidas a muy variados factores. Esto explica que la imagen finalmente detectada no coincida exactamente con el tono-posición-forma-tamaño de los objetos que incluye. En el caso concreto de las imágenes espaciales, las deformaciones más frecuentes pueden agruparse en cuatro apartados (Bernstein, 1978; Mather, 1987):

(i) Distorsiones originadas por la plataforma. Pese a la gran estabilidad de un satélite de observación, muy superior a la que ofrece un avión, pueden producirse pequeñas variaciones en la altitud de su órbita, en la velocidad, o en la orientación de cualquiera de sus tres ejes: alabeo (roll), cabeceo (*pitch*), giro lateral (*yaw*). En el primer caso, se producen cambios en la escala de la imagen, mientras, en el segundo, distorsiones de distinto tipo en su geometría de adquisición (fig. 6.17). Ambos factores pueden considerarse como no sistemáticos, puesto que aparecen de forma esporádica y son, por ello, difícilmente predecibles y complejos de modelar (Welch y Usery, 1984)

(ii) Distorsiones provocadas por la rotación terrestre. Teniendo en cuenta la altitud orbital y el área abarcada por el sensor, el efecto de rotación de la tierra puede aparecer claramente en la imagen. Por ejemplo, en el caso del MSS del satélite Landsat, cada imagen de 185 x 185 km se adquiere, en nuestras latitudes,

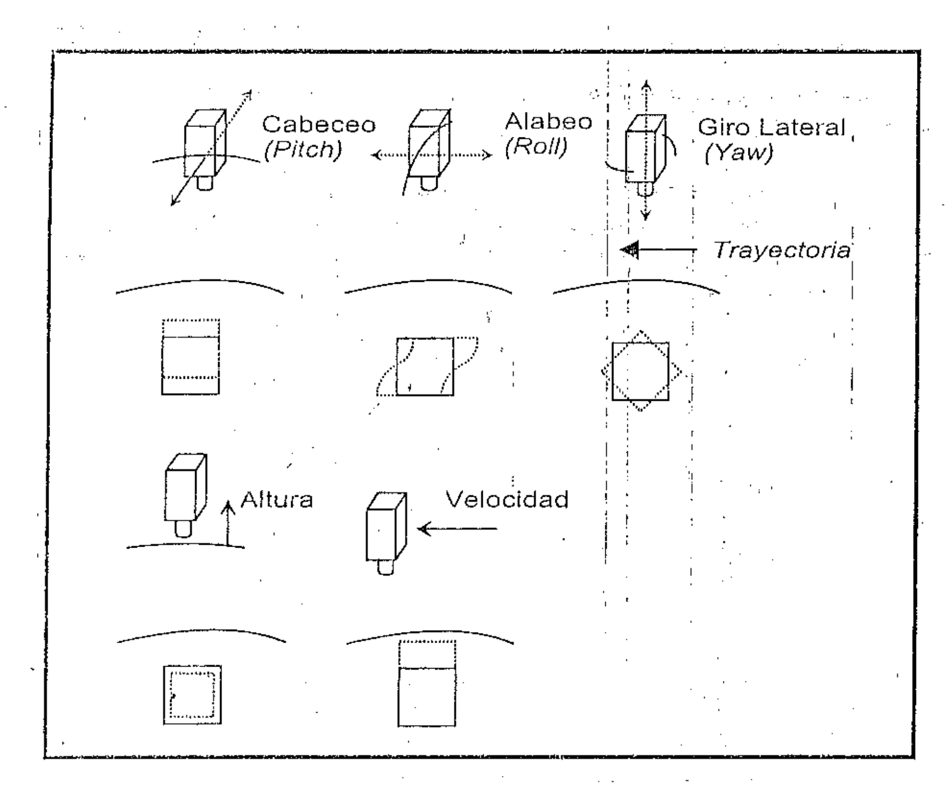


Fig. 6.17 - *Algunas fuentes de error geométrico en una imagen espacial, en la parte inferior de cada esquema se incluye un gráfico sobre el efecto de la deformación*

en unos 28 segundos. En este lapso de tiempo, desde la primera a la última línea de barrido, la Tierra se ha desplazado sensiblemente (unos 8 km), lo que causa, junto a la propia inclinación de la órbita, una orientación de la imagen Noreste-Suroeste. También provocada por la superficie terrestre es la variación del tamaño del píxel por efecto de la curvatura terrestre.

(iii) Distorsiones provocadas por el sensor. Como ya se analizó anteriormente (3.3.2), los sensores de barrido electrónico realizan una exploración perpendicular a la trayectoria del satélite, gracias a un espejo oscilante que envía la radiancia registrada a una cadena de detectores sólidos. Este movimiento puede alterarse por anomalías del sensor, provocando un efecto de barrido no lineal o cambios en el intervalo de recogida de información, lo que implica transformar la resolución efectiva de la imagen. El ángulo con el que se realiza ese barrido tiene también un importante efecto sobre la imagen. En el caso de sensores de ángulo ancho de barrido (AVHRR o CZCS, por ejemplo), se presenta una distorsión panorámica amplia, tanto mayor cuanto más nos alejamos del nadir. En consecuencia, el tamaño del píxel varía sensiblemente desde el centro hacia los extremos de la

imagen (en el caso del AVHRR, con un tamaño de píxel en el nadir de 1,1 x 1,1 km, se puede llegar en los extremos a un tamaño de 2,4 x 6,5 km: Goward et al., 1991). Esto implica, además de las deformaciones geométricas, una notable variación en las perturbaciones debidas a la atmósfera, ya que el espesor óptico cambia del nadir a los extremos. Cuando se trata de sensores con menor campo de visión (MSS, TM o HRV), estos efectos son de menor calibre.

Otro problema frecuente que plantea el sensor es la falta de calibración entre detectores. En los sensores de barrido la exploración se realiza en varias líneas simultáneamente, por lo que requieren varios detectores por banda. Resulta muy importante que todos ellos traduzcan uniformemente la señal detectada, con objeto de que la misma radiancia recibida no se codifique en ND distintos. En ocasiones ese ajuste entre detectores se deteriora, provocándose un efecto de bandeado en la imagen final, especialmente perceptible en las zonas de baja radiancia (sombras, superficie marina). Para el caso de los equipos de exploración por empuje (3.3.3), el problema de calibración es aún mayor, ya que cuentan con un gran número de detectores por línea (6.000 para el canal pancromático del HRV). En este caso, un mal ajuste supondría un bandeado longitudinal en la imagen resultante. Más evidente todavía resultan los fallos momentáneos de alguno de los detectores, ya sea en la emisión, ya en la recepción de la señal. Esto provoca la pérdida de una serie de líneas o píxeles en la imagen final.

(iv) Distorsiones provocadas por la atmósfera. Como ya se comentó en 2.8, los distintos elementos que componen la atmósfera causan una modificación de la radiancia original proveniente de la superficie terrestre. El efecto más importante es el de dispersión del flujo reflejado desde la superficie, a consecuencia de la presencia de aerosoles, gases y vapor de agua. Este efecto implica un aumento de la señal recibida por el sensor y es más sensible en las longitudes de onda cortas, que tienden a presentar un menor contraste entre coberturas de similar comportamiento radiométrico.

Algunos de estos problemas se solventan rutinariamente en los centros encargados de la recepción o venta de las imágenes. Otros, sin embargo, persisten, haciendo precisas una serie de técnicas de ajuste. Por ejemplo, las correcciones radiométricas son vitales para modelar parámetros físicos a partir de la imagen (ver 7.1), o para abordar estudios multi-temporales (ver 7.3). En este último caso, también son necesarias las correcciones geométricas, así como siempre que se pretenda relacionar la imagen con algún tipo de información auxiliar.

6.5.2. Correcciones radiométricas

Este es un término muy genérico, que designa aquellas técnicas que modifican los ND originales, con objeto de acercarlos a los que habría presentes en la

imagen caso de una recepción ideal. Dentro de este concepto se engloban los problemas radiométricos derivados del mal funcionamiento del sensor. En el marco de la transformación de ND a parámetros físicos (reflectividad y temperatura) abordaremos la corrección del efecto atmosférico y las variaciones de iluminación debidas al relieve (cap. 7.1.2).

6.5.2.1. Restauración de líneas o píxeles perdidos

Un mal funcionamiento del sensor o de la antena receptora de la imagen puede llevar a que ésta aparezca con algunas líneas o píxeles perdidos. En una visualización, la imagen presentaría una serie de líneas anómalas (negras o blancas), o incluso una serie de píxeles aislados de aspecto muy contrastado con los vecinos (efecto conocido como de «sal y pimienta»). En ambos casos, se trata de información irreparablemente perdida. No puede restaurarse lo que nunca se obtuvo: por tanto, los procesos de corrección se dirigen aquí a mejorar artificialmente el aspecto visual de la imagen, facilitando su posterior interpretación.

La forma más lógica de estimar los ND de estos píxeles erróneos se basa en los ND de los píxeles vecinos. De acuerdo al conocido fenómeno de la auto-correlación espacial, muchas variables geográficas tienden a presentar una fuerte asociación en el espacio (Cliff y Ord, 1973; Campbell, 1981). La probabilidad de que aparezca una precipitación similar a la de una determinada estación, por ejemplo, es muy alta en estaciones cercanas, reduciéndose según nos alejamos de aquélla. De igual forma, los valores de radiancia provenientes de una parcela de la superficie terrestre tienden a estar positivamente correlacionados con los provenientes de parcelas vecinas. Por ello, parece razonable estimar los ND de las líneas perdidas a partir de los ND de las inmediatas. Este criterio de vecindad puede introducirse de distintas formas. La más sencilla es sustituir el ND de cada línea/píxel por el de los precedentes:

$$ND_{i,j} = ND_{i-1,j} \qquad [6.5]$$

donde $ND_{i,j}$ corresponde al nivel digital del píxel de la línea i (la defectuosa) y columna, j, y $ND_{i-1,j}$, indica el nivel digital del píxel situado en la línea precedente. También podría incluirse i+1, para sustituir las líneas defectuosas por las posteriores.

Un segundo método de sustitución promedia los valores de las líneas anterior y posterior a la defectuosa. Esto es:

$$ND_{i,j} = \text{ent}\{(ND_{i-1,j} + ND_{i+1,j})/2\} \qquad [6.6]$$

en donde ent { } indica que el resultado de la operación debe convertirse en el número entero más cercano. De acuerdo con Mather (1987), este segundo método

resulta más arriesgado que el primero, sobre todo en aquellos casos en donde es menos claro asumir una auto-correlación espacial.

Un tercer método de recuperar la información perdida utiliza una banda auxiliar, altamente correlacionada con la que presenta problemas. A partir de esta banda auxiliar, se estima el valor de los píxeles defectuosos de la forma siguiente (Bernstein et al., 1984):

$$ND_{i,j,k} = (s_k / s_r)\{ND_{i,j,r} - (ND_{i+1,j,r} + ND_{i-1,j,r})/2\} + (ND_{i+1,j,k} + ND_{i-1,j,k})/2 \qquad [6.7]$$

donde s_k y s_r son las desviaciones típicas de la banda a restaurar **k** y la banda auxiliar **r**, respectivamente. Al igual que en el caso anterior, el resultado debería convertirse al valor entero más cercano.

En cualquiera de los tres algoritmos [6.5 a 6.7], se asume que las líneas defectuosas ya han sido localizadas. Esto puede ser una tarea trivial en algunos casos, pero en otros resulta bastante complejo. Por ello, puede emplearse un método de búsqueda automática, que parte de comparar la media aritmética de cada línea con la de las líneas anterior y posterior. Si difiere de ellas significativamente —esto es, por encima de un determinado umbral—, se realiza un estudio más detallado de los ND que la componen, con objeto de detectar valores anómalos (0 ó 255, por ejemplo). Si éstos aparecen, puede considerarse que aquella línea está afectada por algún tipo de error, y aplicarse sobre ella uno de los algoritmos previamente tratados.

Lo mismo cabe decir respecto a píxeles que muestren un valor anómalo, fruto de un error en la adquisición o recepción de los datos. En estos casos, será aún más complicado localizar visualmente los píxeles erróneos. Lillesand y Kiefer (1994, pp. 536-541) proponen un método de búsqueda automática, basado en detectar aquellos píxeles que cuenten con un ND significativamente más alto o más bajo que el promedio de sus vecinos (calculado, normalmente, a partir de una ventana móvil de 3 x 3 píxeles). Caso de que el ND del píxel central de dicha ventana exceda, por encima o debajo de un cierto umbral, al ND medio de los píxeles vecinos, se sustituye por éste.

6.5.2.2. Corrección del bandeado de la imagen

En algunas imágenes obtenidas por equipos de barrido secuencial (sobre todo en los primeros sensores Landsat-MSS), se observa un bandeado de la imagen, especialmente perceptible en las zonas de baja radiancia (láminas de agua). Este bandeado, conocido como *striping* en la terminología anglosajona, se debe a un mal calibrado entre los detectores que forman el sensor; esto es, a que alguno de ellos codifique la radiancia que recibe en ND superiores o inferiores al resto. Como se vio más arriba, los equipos de barrido multi-espectral exploran varias líneas simultá-

neamente a cada oscilación del espejo. Caso de que los detectores presenten inconsistencias, aparecerán en la imagen unas líneas más oscuras o claras que el resto. El efecto, además, es periódico, ya que cada detector registra 1 de cada **p** líneas, siendo **p** el número de detectores por banda. En el caso del sensor MSS, se registran 6 líneas simultáneamente, mientras este número se eleva a 16 para el TM.

Para ajustar digitalmente la señal detectada por cada uno de los detectores, se asume que todos ellos, caso de estar bien calibrados, tenderían a presentar similares histogramas. Basta, por tanto, recomponer el histograma de cada detector, calculando independientemente la frecuencia de los **p** grupos de líneas (fig. 6.18). Por ejemplo, caso de trabajarse sobre una imagen MSS, con seis detectores por banda, se calcula, por un lado, el histograma de las líneas 1, 7, 13, 19, 25..., esto es, las recogidas por el primer detector; por otro, el correspondiente a las líneas 2, 8, 14, 20, 26... (segundo detector), y así sucesivamente hasta completar los seis detectores.

El paso siguiente intenta ajustar estos histogramas a otro que se elija como referencia. Lo más habitual es que el histograma de referencia sea el del conjunto de la imagen, formado por todas las líneas que la componen. La forma más sencilla de realizar el ajuste se basa en aplicar unos coeficientes lineales (sesgo y ganancia) a los histogramas de cada detector, con objeto de igualar sus medias y desviaciones típicas con las del histograma de referencia. Aunque existen otros procedimientos no lineales (considerando el histograma acumulativo), el método lineal ofrece, en la mayor parte de los casos, buenos resultados.

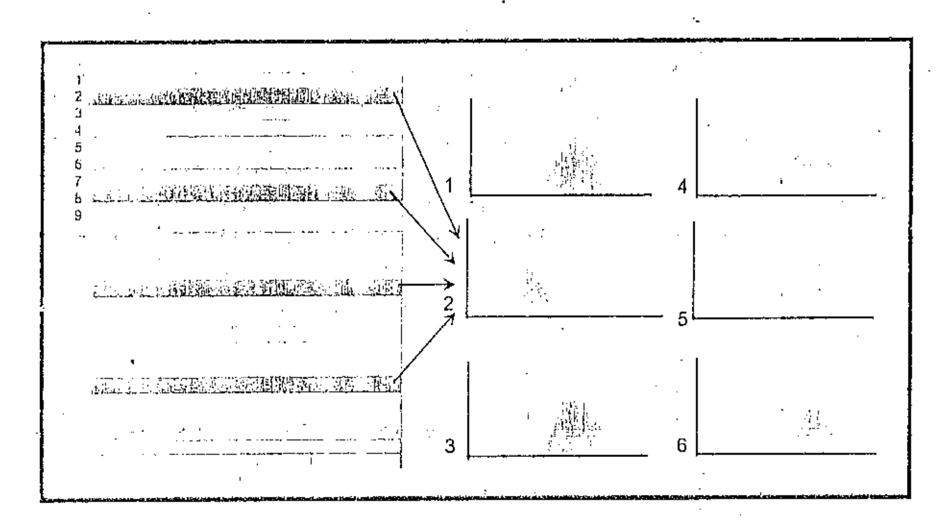


Fig. 6.18 - *Para corregir el bandeado de la imagen puede utilizarse un histograma parcial de cada conjunto de p líneas de la imagen, siendo p el número de detectores (adaptado de Campbell, 1987).*

Su proceso parte de calcular la media y desviación típica de cada histograma parcial; esto es, del correspondiente a los píxeles codificados por un determinado detector. Posteriormente, para ajustar estos valores a los encontrados para el histograma de referencia basta aplicar:

$$b_i = s / s_i \qquad [6.8]$$

y

$$a_i = \overline{ND} - b_i \overline{ND_i} \qquad [6.9]$$

donde s y s_i indican las desviaciones típicas del histograma de referencia y parcial, respectivamente; $\overline{ND}$ y $\overline{ND_i}$, los ND medios para ambos, y a_i y b_i los coeficientes de ajuste. A partir de estos coeficientes puede calcularse el valor corregido, aplicando una sencilla función:

$$ND_{i,j}' = a_i + b_i\, ND_{i,j} \qquad [6.10]$$

en donde el ND de salida se calcula a partir de aplicar unos coeficientes de ajuste al ND de entrada. Para reducir el volumen de cálculos, este algoritmo suele aplicarse a partir de una técnica muy similar a las tablas de color (LUT) que veremos más adelante (6.6).

6.5.3. Correcciones geométricas

6.5.3.1. Introducción

Las correcciones geométricas de la imagen incluyen cualquier cambio en la posición que ocupan los píxeles que la forman. Por contraposición con las correcciones radiométricas, aquí no se pretende modificar los ND de los píxeles de la imagen, sino sólo su posición, sus coordenadas. Gracias a tratarse de un formato digital, esta transformación puede basarse en funciones numéricas, que permiten modificar muy flexiblemente la geometría de la imagen. La expresión general de este tipo de funciones sería:

$$f(c') = f_1\,(c,l)$$

$$f(l') = f_2\,(c,l)$$

Esto es, las coordenadas columna y línea (c' y l') de la imagen corregida son función de las coordenadas columna y línea de la imagen de entrada (*c*, *l*) o de las coordenadas del mapa al que se pretende superponer la imagen (*x*, *y*).

Por tanto, esta transformación puede emplearse tanto para corregir cartográficamente una imagen, como para superponer dos o más imágenes entre sí. En el primer caso, se pretende encontrar una relación que transfiera los ND de la imagen a su posición cartográfica, en la proyección requerida (habitualmente la Universal Transversal de Mercator, UTM, estándar en España y en la mayor parte de los países vecinos). Esto permite que la imagen resultante pueda combinarse con información auxiliar o integrarse a un Sistema de Información Geográfica (cap. 9). En el segundo caso, la transformación geométrica de la imagen tiene por objetivo ajustarla a otra imagen que se considera como referencia, normalmente con objeto de realizar estudios multitemporales (cap. 7.3).

La corrección geométrica de imágenes puede abordarse de acuerdo a dos procedimientos. En el primero, denominado corrección orbital, se pretende modelar aquellas fuentes de error geométrico conocidas, a partir de aplicar transformaciones inversas a las que realiza el sensor en el momento de la adquisición. Para ello, es preciso disponer, con bastante precisión, de las características orbitales de la plataforma y de las especificaciones del sensor. Gracias a ellas, pueden corregirse errores sistemáticos, como son los derivados de la rotación o curvatura terrestre y de la inclinación de la órbita. El segundo enfoque resulta más empírico. Se trata de modelar el error geométrico de la imagen a partir de una serie de puntos con coordenadas conocidas, que se denominan puntos de control. En este caso, el error se modela inductivamente, ya que en las funciones de transformación se incluyen simultáneamente todas las fuentes de error, asumiendo, como es lógico, que esos puntos sean suficientemente representativos de la deformación geométrica que tiene la imagen.

Ambos métodos tienen sus ventajas e inconvenientes. El primero es mucho más automático, pues los datos orbitales se reciben directamente con las imágenes y apenas se requiere intervención humana. Resulta, además, muy adecuado cuando el sensor no proporciona información fiable para localizar los puntos de control, ya sea por tratarse de imágenes marinas (sin referencias visuales), ya con cobertura de nubes o con una resolución tan grosera que apenas puedan identificarse rasgos cartográficos. Éste es el procedimiento habitualmente empleado para corregir imágenes de baja resolución (AVHRR o Meteosat). Su principal inconveniente es la escasa precisión cuando la telemetría del satélite no es muy exacta o cuando la imagen incluye errores aleatorios, como los debidos a movimientos imprevistos del sensor o al relieve local, que pueden llegar a suponer desplazamientos del orden de ±5 píxeles (Ho y Asem, 1986). No obstante, con modelos más elaborados, que pueden incluir algún punto de control terrestre, el orden de precisión se eleva hasta ±1 píxel (Emery et al., 1989; Rosborough et al., 1994). Por su parte, el método de puntos de control resulta bastante tedioso, pues requiere una notable intervención humana para localizar adecuadamente esos puntos, pero ofrece una alta precisión cuando se

trabaja sobre zonas e imágenes en donde es clara la identificación de rasgos comunes a la cartografía básica.

6.5.3.2. Corrección a partir de modelos orbitales

Como se ha indicado, estas correcciones resultan muy adecuadas para sensores de baja resolución o que trabajan sobre áreas marinas, en donde resulta muy complicado buscar puntos de control. El creciente interés por el empleo de imágenes AVHRR ha subrayado el papel de estas correcciones, ya que son paso obligado para su análisis. Habitualmente, al aplicar correcciones orbitales se utiliza el término 'navegación' de la imagen (Emery et al., 1989), ya que se pretende localizar sobre una malla geográfica cada uno de los píxeles que la forman. La corrección de imágenes AVHRR implica un proceso matemático complejo, que excede el carácter introductorio de esta obra. Para una referencia completa puede consultarse Ho y Asem (1986) o Emery et al. (1989). Baste aquí indicar que su principal escollo es localizar exactamente la posición geográfica del satélite, de tal forma que puedan relacionarse automáticamente sus coordenadas de imagen con las coordenadas cartográficas de interés. Es preciso conocer su altitud, que varía a lo largo de la órbita ya que no sigue un modelo circular sino elíptico, su velocidad y meridiano de cruce con el Ecuador, así como la velocidad de barrido del sensor. A partir de esa información, los parámetros más sencillos de corregir son los derivados de errores sistemáticos en la adquisición, como son los siguientes:

(i) Inclinación de la imagen. Tanto el NOAA como otros satélites de órbita polar adquieren las imágenes con un pequeño ángulo respecto al Norte geográfico. Esto implica una inclinación del eje de la imagen hacia el Noreste. Además, durante el tiempo de adquisición de la imagen, la Tierra se desplaza hacia el Este, en una distancia variable con la latitud, la velocidad angular del satélite y el tamaño del área cubierta en la imagen. Estos problemas pueden obviarse de acuerdo a las siguientes fórmulas (Richards, 1993, pp. 48-54: fig. 6.19).

$$\Delta x = \Delta x_e \cos \delta \quad [6.11]$$

$$\Delta x_e = v_e T_s \quad [6.12]$$

$$v_e = \omega_e r_e \cos \phi \quad [6.13]$$

$$T_s = L/(r_e \omega_0) \quad [6.14]$$

De la primera [6.11], se deduce que el desplazamiento de la imagen en el eje x (Δx) es igual al desplazamiento debido al movimiento de la tierra (Δx_e) multiplicado por el coseno del ángulo de inclinación de la órbita (δ). A su vez, de [6.12] deducimos que ese desplazamiento de la Tierra (Δx_e) es debido a su veloci-

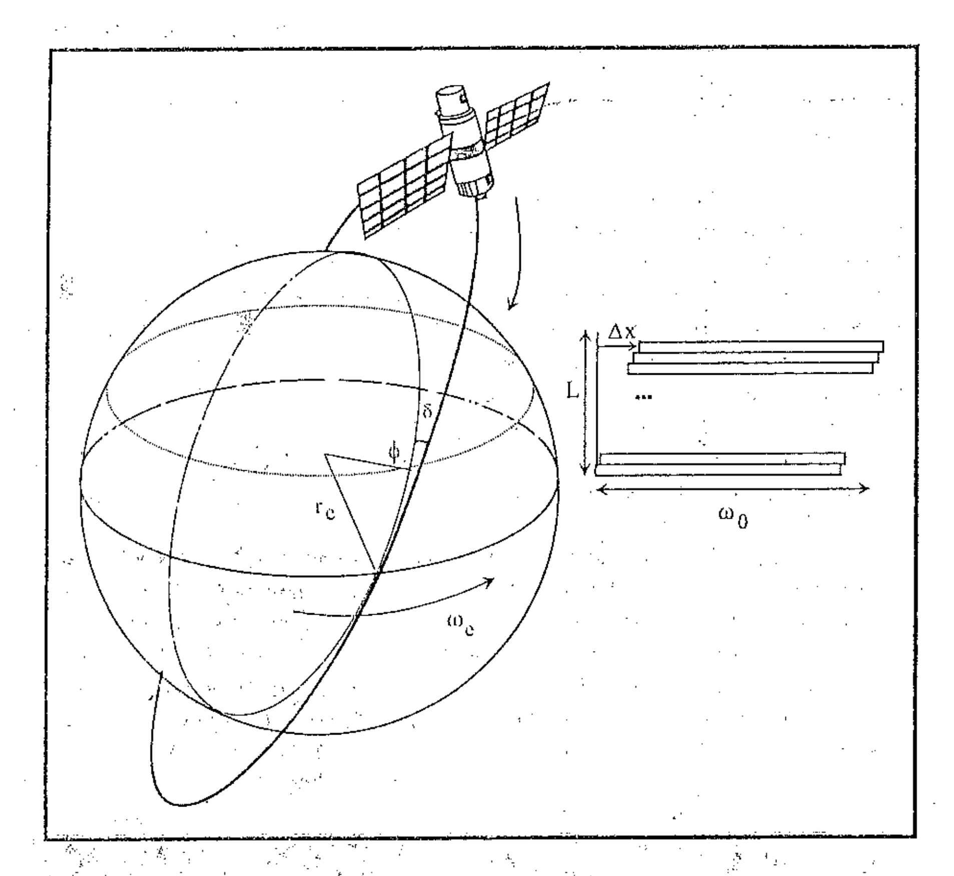


Fig. 6.19 - *Errores introducidos por la rotación terrestre en la adquisición de imágenes*

dad angular (v_e) y al tiempo de adquisición de la imagen (T_s). La velocidad angular puede calcularse a partir de la velocidad rotacional de la Tierra (ω_e=72,72 microradianes/s), del radio terrestre ($r_e \approx$ 6.378 km) y de la latitud de la imagen (ϕ). Por su parte, el tiempo de adquisición está en función del área cubierta (L) y de la velocidad angular del satélite (ω_0). En definitiva, basta saber la inclinación de la órbita del satélite, su velocidad angular y el área que abarcan sus imágenes para posicionarlas aproximadamente hacia el norte.

(ii) Distorsión panorámica. En cualquier sensor óptico las imágenes se adquieren desde un punto de observación, por lo que los parámetros de adquisición (sobre todo la distancia sensor-Tierra) sólo son exactos en la vertical del mismo (punto nadir). Entre otros efectos de esta observación panorámica, uno de los más agudos es la variación del tamaño del píxel desde el nadir a los extremos, pues aumenta la distancia entre el sensor y el punto observado. En el caso de imágenes Landsat o SPOT ese efecto es poco importante, pues su ángulo global

de observación no es excesivamente grande. No es así para las imágenes AVHRR, que cuentan con un gran ángulo de barrido, lo que implica errores considerables hacia los extremos del área observada.

Una sencilla corrección de este efecto panorámico viene dada por las fórmulas siguientes:

$$p' = p / \cos \gamma \qquad [6.15]$$

en la dirección **y** del píxel (altura), y

$$p'' = p / \cos^2 \gamma \qquad [6.16]$$

en la dirección **x** del píxel (anchura), siendo **p** el tamaño del píxel en el nadir y γ el ángulo instantáneo de barrido (formado por la línea de observación y la vertical al sensor (fig. 6.20). En este esquema se asume que el campo de visión instantáneo (IFOV) es constante. Esta corrección permite ajustar el tamaño del píxel con la distancia al nadir, a lo largo de cada línea de barrido.

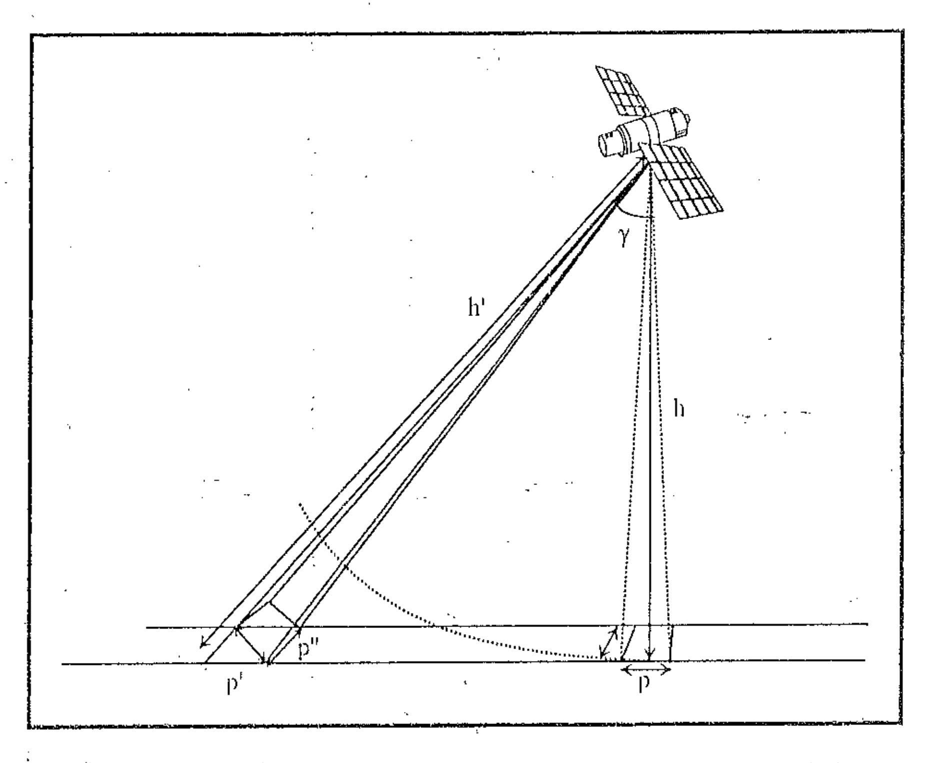


Fig. 6.20 - *Errores geométricos provocados por la distorsión panorámica (adaptado de Richards, 1993)*

(iii) Efecto de la curvatura terrestre. Mientras en el caso de la fotografía aérea, el área observada permite asumir la Tierra como plana, en las imágenes de satélite la esfericidad terrestre no puede obviarse, especialmente en aquellos sensores que observan una superficie muy vasta, como es el caso del AVHRR. Para mitigar este efecto, puede abordarse la siguiente corrección (Richards, 1993: fig. 6.21):

$$p_c = \frac{\beta(h + r_e(1 - \cos\varphi))}{\cos\gamma\cos(\gamma + \varphi)} \qquad [6.17]$$

donde p_c indica el tamaño del píxel corregido del efecto de curvatura, β es el ángulo de visión instantánea, h la altura del sensor, r_e el radio de la Tierra, γ el ángulo de barrido y φ el formado por el centro del píxel observado y el centro de la Tierra.

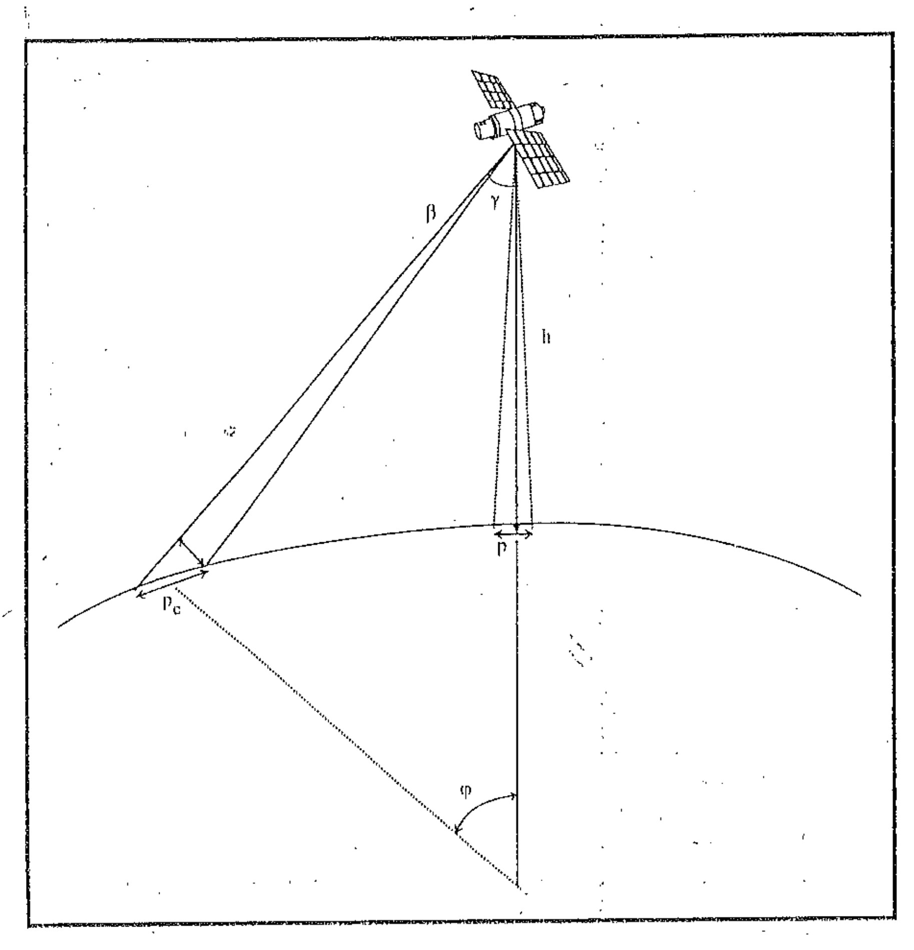


Fig. 6.21 - *Errores provocados por la curvatura terrestre (adaptado de Richards, 1993)*

A partir de estas ecuaciones, conociendo la posición geográfica del satélite, puede navegarse la imagen, generando una malla de coordenadas x,y con los ND adquiridos por el sensor más aproximados a cada posición. Este proceso de interpolación es relativamente similar al que veremos para la corrección con puntos de control. El conjunto del proceso implica un volumen considerable de cálculo, ya que las ecuaciones de ajuste son bastante complejas. En ocasiones, los modelos orbitales se apoyan en la localización de algún punto de control terrestre, para mejorar la estimación de las condiciones de orientación del satélite (*attitude*). Una revisión reciente sobre el proceso de navegación de una imagen AVHRR puede analizarse en Rosborough et al. (1994).

La figura 6.22 incluye una secuencia de imágenes AVHRR adquiridas en tres días consecutivos. A la izquierda aparecen las imágenes originales, mostrando los efectos de distorsión geométrica que estas imágenes incluyen. Los extremos aparecen severamente deformados, cambiando ese área según se desplaza el centro de la imagen hacia el Oeste. A la derecha, aparece el sector que incluye la imagen de Buñol, tras la corrección orbital, referenciada en proyección UTM.



Fig. 6.22 - *Efecto de la corrección orbital de imágenes. Serie de imágenes diarias del sensor NOAA-AVHRR correspondiente a la zona de Buñol (la serie corresponde al 17, 18 y 19 de julio de 1991).*

6.5.3.3. Corrección a partir de puntos de control

La segunda alternativa de corrección es más empírica. Asume que no se conoce la fuente de los errores, pero que éstos pueden modelarse a partir de ajustar unas ecuaciones a un conjunto de puntos, de los que se conoce tanto las coordenadas de imagen a corregir como las del mapa o imagen de referencia. En ambos casos, la corrección se realiza en tres fases (fig. 6.23): (i) localización de puntos comunes a la imagen y al mapa (o a otra imagen de referencia), (ii) cálculo

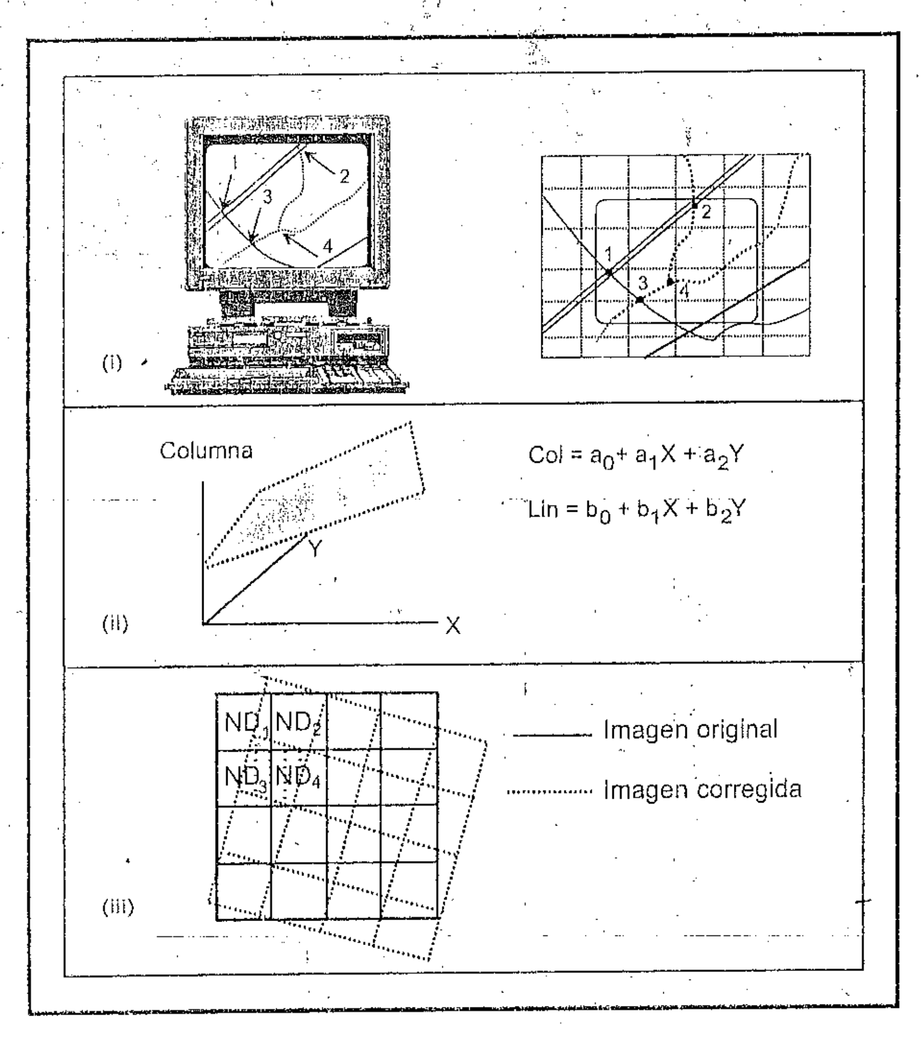


Fig. 6.23 - *Fases del proceso de corrección geométrica: (i) localización de puntos de control, (ii) ajuste de las ecuaciones de deformación, (iii) trasvase de las coordenadas a la nueva posición.*

de las funciones de transformación entre las coordenadas de la imagen y las del mapa, y (iii) trasferencia de los ND originales a la nueva posición, definida por la transformación previa.

6.5.3.3.1. Establecimiento de puntos de control

Para calcular cualquier función entre dos o más variables, es necesario contar previamente con una serie de observaciones comunes a todas ellas. De la misma forma, las funciones que permiten transformar coordenadas entre la imagen y el mapa precisan localizar una serie de puntos comunes a ambos, que se conocen como puntos de control. A partir de las coordenadas imagen y mapa de esos puntos, se calculan las funciones de ajuste, de forma similar a como se obtienen en otras regresiones multivariables. En consecuencia, la calidad del ajuste dependerá de la precisión con que se localicen esos puntos, y de cómo esos puntos sean suficientemente representativos de los errores geométricos de la imagen. Una inexacta localización de esos puntos, tanto en la imagen como en el mapa, o una distribución muy sectorizada, implicará una estimación inadecuada y, por tanto, una corrección geométrica errónea. En definitiva, el establecimiento de puntos de control resulta la fase más crucial del proceso de corrección, y la que demanda mayor dedicación humana.

Para que el ajuste entre imagen y mapa sea correcto, se requiere atender a tres aspectos en la selección de los puntos de control: (i) número, (ii) localización, y (iii) distribución.

El número idóneo de puntos de control depende del tamaño y la complejidad geométrica de la imagen. Si se trata de zonas planas, adquiridas por un sensor de estrecho campo de visión, la transformación imagen-mapa puede basarse en ecuaciones lineales simples. Por el contrario, si se trata de un terreno rugoso o el sensor varía notablemente las condiciones de observación, será preciso aplicar funciones de transformación complejas, con polinomios de segundo o tercer grado. En términos generales, cabe decir que cuanto mayor sea el grado de la ecuación de ajuste, se precisa también un mayor número de puntos de control. Matemáticamente sólo son necesarios 3 puntos para una función de ajuste de 1[er] grado, 6 para una de 2[o] grado y 10 para una de 3[er] grado. Ahora bien, conviene superar con creces ese listón mínimo para garantizar una buena conformidad entre imagen y mapa. Bernstein (1978) aconseja seleccionar entre 14 y 20 puntos para corregir una imagen MSS, mientras el *National Remote Sensing Center* inglés utiliza de 100 a 120 puntos para hacer lo propio con una imagen TM (Davison, 1984). Para una zona pequeña (512 x 512 píxeles, por ejemplo), 10 ó 12 puntos y una transformación de primer grado serán normalmente suficientes. En caso de que el contraste topográfico sea importante, convendrá seleccionar un mayor número de puntos, y acudir a polinomios de transformación más complejos.

En cuanto a la localización, se recomienda que sean puntos claramente identificables en la imagen y en el mapa, preferiblemente rasgos humanos del paisaje no sujetos a dinamismo temporal: cruces de carreteras, presas, vías de ferrocarril, etc. No conviene señalar puntos en la línea de costa, pues el efecto de la marea puede modificar la localización exacta de un accidente geográfico. La misma idea puede aplicarse a los cursos de agua o embalses, que sufren alteraciones estacionales, en ocasiones de gran importancia. Algún elemento destacado de la vegetación podría utilizarse como punto de control, siempre que se disponga de la cartografía temática apropiada y no se hayan producido cambios entre la fecha de la imagen y la del mapa. En caso de que se pretenda el registro de dos imágenes, la búsqueda de puntos comunes resulta más sencilla, ya que hay rasgos visualizables en una imagen que no se recogen en la cartografía básica, como es el caso de manchas características de vegetación o ciertas parcelas agrícolas. La mayor parte de los programas de tratamiento permiten visualizar las dos imágenes a corregir simultáneamente, lo que facilita mucho la selección de los puntos de control.

Respecto a su distribución, conviene que estos puntos se sitúen uniformemente sobre todo el territorio abarcado en la imagen. Esto evitará errores debidos a una ponderación excesiva de algún sector del área de estudio, en donde el ajuste será bueno a expensas de otros sectores de la imagen. Esto es especialmente importante cuando la zona presente contrastes topográficos y se utilicen ecuaciones de segundo o tercer grado (Richards, 1993; Novak, 1992). Aunque el efecto de desplazamiento del relieve es menor que en el caso de la fotografía aérea (debido a la altura de la órbita), también en las imágenes de satélite existe un efecto de desplazamiento que puede causar serios problemas en su ajuste cartográfico. Para intentar paliarlos, cuando no se disponga de un buen modelo digital de elevaciones, puede ser recomendable tomar puntos de control sobre áreas de distinta altitud, siempre que éstas resulten bien identificables en la imagen.

Nuestra propia experiencia indica que la selección de puntos de control es una tarea bastante laboriosa. En caso de un registro entre dos imágenes, el proceso se simplifica, puesto que es más sencillo identificar puntos comunes entre dos imágenes que entre imagen y mapa. En el primer caso, pueden utilizarse cruces de caminos y rasgos destacados de la vegetación, de difícil o imposible localización en un mapa. Además, en el caso de corregir distintas imágenes de la misma zona para un análisis multitemporal, puede automatizarse el proceso de búsqueda de puntos comunes, a partir de señalar en una sola, de modo muy preciso, esos puntos, situando en las otras unas ventanas de búsqueda, en torno a cada punto de control (Ortí et al., 1979).

La figura 6.24 recoge la localización de los puntos de control seleccionados para la imagen de Madrid. Se trata ésta de una zona especialmente idónea para esta labor, por cuanto existen múltiples rasgos humanos, claramente identificables sobre la imagen y el mapa. Para simplificar el comentario, hemos

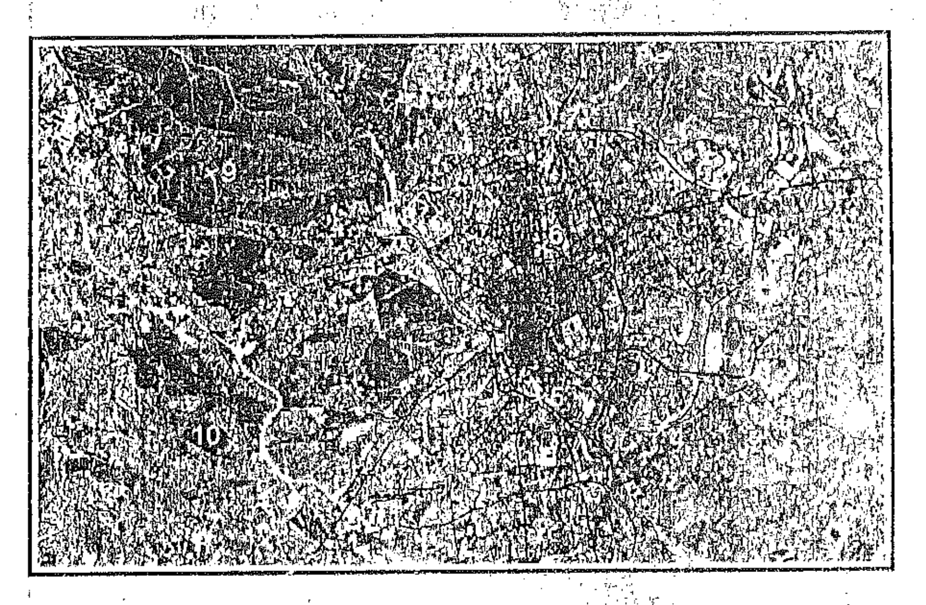


Fig. 6.24 - *Puntos de control seleccionados para la corrección de la imagen de Madrid*

señalado once puntos de control. La tabla 6.3 incluye las coordenadas columna, línea de la imagen y, X,Y del mapa para esos puntos. La cartografía base se corresponde a una hoja 1:25.000 del Instituto Geográfico Nacional, realizada en proyección U.T.M.

Número	X-mapa	Y-mapa	Columna	Fila
1	452450	4480500	992	102
2	450300	4478100	936	195
3	448500	4471100	923	431
4	444750	4469800	810	498
5	440300	4472100	651	453
6	441500	4477750	653	264
7	443050	4481950	677	117
8	436125	4479900	464	230
9	429550	4483050	227	165
10	428150	4472750	253	512
11	432900	4469450	428	591

Tabla 6.3 - *Coordenadas de los puntos de control utilizados para corregir la imagen de Madrid*

6.5.3.3.2. Cálculo de las funciones de transformación

Como se comentó más arriba, la corrección digital de la geometría de una imagen se realiza estableciendo unas funciones, que pongan en relación las coordenadas de la imagen con las del mapa. De esta forma, a partir de las coordenadas X,Y del mapa puede estimarse que columna y línea de la imagen corresponde a esa localización. Esquemáticamente esta transformación puede expresarse como (Mather, 1987):

$$\hat{s} = \Sigma_{j=0,m} \Sigma_{k=0,m-j}\, a_{j,k} X^j Y^k \qquad [6.18]$$

donde $\hat{s}$ indica la coordenada estimada de la imagen corregida, que se obtiene a partir de las coordenadas del mapa **X** y **Y**. El superíndice **m** indica el grado del polinomio de ajuste. El caso más simple sería el de una ecuación lineal, en donde:

$$\hat{c}_i = a_0 + a_1 X_i + a_2 Y_i$$
$$\hat{l}_i = b_0 + b_1 X_i + b_2 Y_i \qquad [6.19]$$

donde $\hat{c}$ y $\hat{l}$ son las coordenadas estimadas columna y línea, respectivamente, para unas coordenadas determinadas del mapa, X_i e Y_i.

Como puede comprobarse, se trata de una regresión lineal múltiple, donde a_0, a_1, a_2, b_0, b_1 y b_2 son los coeficientes de regresión; X_i e Y_i, las variables independientes, y c_i, l_i las dependientes. También podrían formularse otras dos ecuaciones similares, en donde las variables estimadas fueran las coordenadas X,Y del mapa, a partir de las coordenadas c,l de la imagen. En definitiva, la conversión puede realizarse en un doble sentido: desde las coordenadas del mapa a la imagen y viceversa.

Al igual que en la regresión convencional, estas funciones pueden definirse gráficamente por un plano, que expresa la relación entre las coordenadas de las variables independientes (eje X e Y), y la variable dependiente (eje **c** o **l**). Desde el punto de vista práctico, conviene considerar que basta una función lineal para abordar un amplio conjunto de transformaciones de la imagen, como cambiar su escala y origen, inclinarla, modificar la relación entre sus ejes y rotarla (fig. 6.25). Estas alteraciones serán, de modo habitual, suficientes para corregir imágenes pequeñas, siempre que no se presenten contrastes altimétricos importantes. En caso de precisar una modificación más rigurosa, puede acudirse a funciones de segundo o tercer grado, en donde se abordan alteraciones geométricas no lineales (en otras palabras, la función no se define por un plano, con ejes lineales, sino por una superficie, con ejes curvilíneos). Por razones de mayor sencillez en la exposición, nos centraremos en las funciones de primer grado, si bien pueden aplicarse los comentarios al caso de polinomios más complejos.

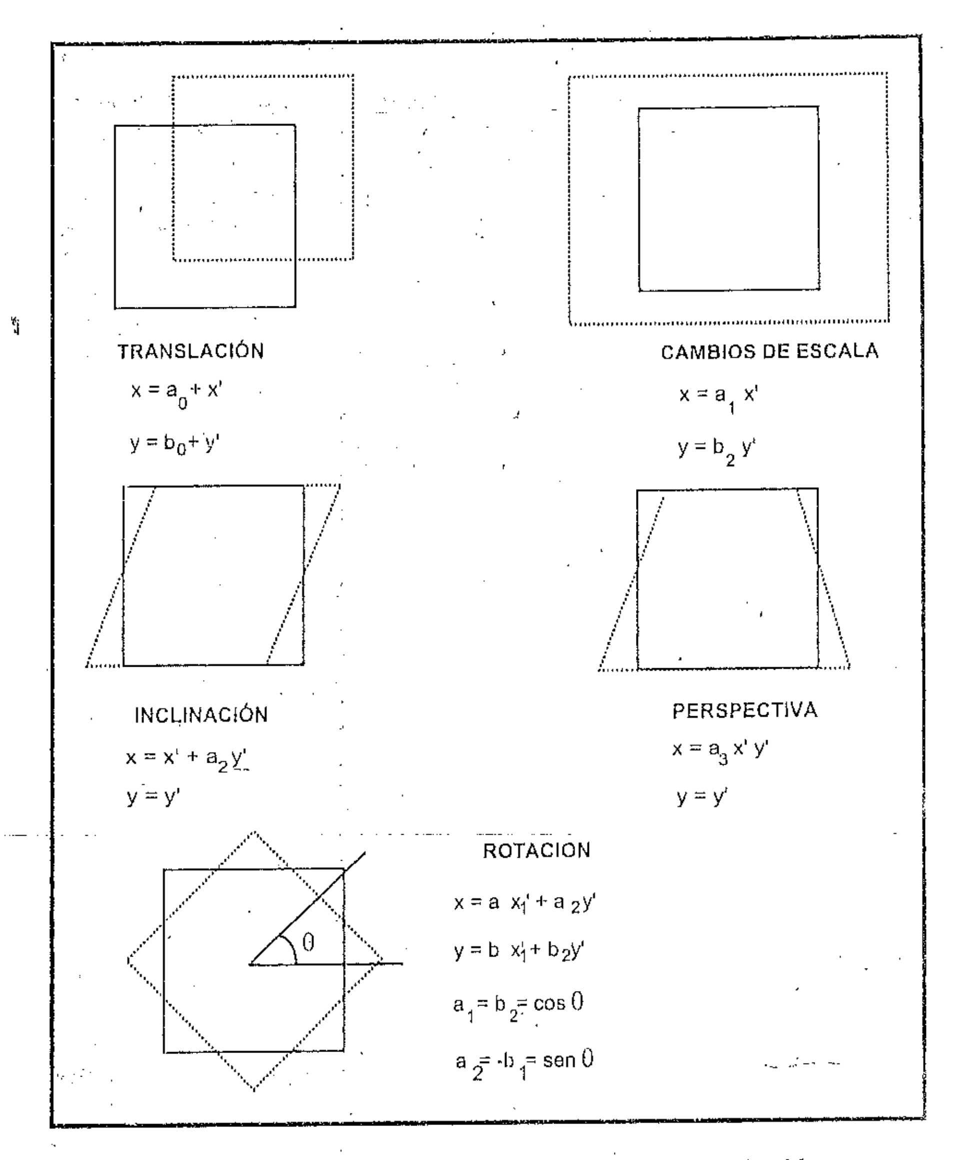


Fig. 6.25 - *Ejemplos de transformación geométrica aplicables a una imagen digital (adaptado de Schowengerdt, 1983)*

Los coeficientes de las funciones de transformación (a_0, a_1, a_2, etc.), se calculan a partir de las coordenadas de los puntos de control seleccionados previamente. El método más habitual para obtenerlos es aplicar un ajuste por mínimos cuadrados, con operaciones de cálculo idénticas a las que requiere una regresión múltiple convencional (Snedecor y Cochran, 1980; Jensen, 1996, pp. 132-135e).

La bondad del grado de ajuste conseguido se mide por la importancia de los residuales. Como es bien sabido, el residual de la regresión es la diferencia entre el valor estimado y el observado, para cada uno de los puntos muestrales empleados en el proceso. Cuanto mayor sea ese valor, el ajuste entre las variables independiente y dependiente es menor. En nuestro caso, la calidad de la corrección geométrica puede valorarse comparando, para cada punto de control, las coordenadas estimadas por la regresión con las reales. El promedio de los residuales habitualmente se conoce como error medio cuadrático (*Root Mean Squared*, RMS). El RMS se calcula como la raíz cuadrada de las desviaciones entre los valores observados y los estimados por la regresión. En nuestro caso:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\Sigma_{i=1,n}(\hat{c}_i - c)^2 + (\hat{l}_i - l)^2}{n}} \qquad [6.20]$$

También puede calcularse el RMS para cada punto, como la raíz de los residuales al cuadrado para ese punto. Ese valor no es más que la distancia entre sus coordenadas reales y las estimadas por la regresión. En consecuencia, podemos también denominar al RMS de un punto como error longitudinal (EL) (fig. 6.26)[4]. El promedio de esos EL para todos los puntos de control nos permite cuantificar la distancia media a la que se encuentran las coordenadas reales y las estimadas por el modelo. Podría así definirse el error longitudinal medio (ELM):

$$\text{ELM} = \frac{\Sigma_{i=1,n}\text{EL}_i}{n} \qquad [6.21]$$

para las dos coordenadas, o para cada una, considerando sólo las desviaciones en columna o línea. El ELM, o el RMS antes visto, pueden usarse para evaluar la calidad general del ajuste. Si el promedio supera un cierto valor previamente indicado (habitualmente igual o inferior a 1 píxel), será conveniente corregir aquellos puntos con un alto EL o eliminarlos si la posición es dudosa y elegir otros nuevos. También puede ser adecuado utilizar una ecuación de ajuste de mayor grado (segundo o tercero), pues los altos errores pueden ser debidos a un relieve muy vigoroso. No obstante, esta opción debe utilizarse juiciosamente, ya que si los puntos no se introdujeron correctamente, las ecuaciones de tercer grado pueden implicar deformaciones notables en la imagen, aun cuando los residuales sean bajos (Richards, 1993, pp. 67-70). Por ésta y otras razones, para verificar adecuadamente la corrección geométrica es necesario introducir nuevos puntos test, que no se hayan utilizado en el cálculo de la ecuación de ajuste, y permitan

[4] Empleando este término puede resolverse un frecuente confusión que considera al RMS como sólo aplicable al conjunto de los puntos (por el término, error medio), y no a cada punto individualmente. Además, es más acorde con la variable que estamos estimando (posición) y con el tipo de errores que cometemos (distancia al punto observado).

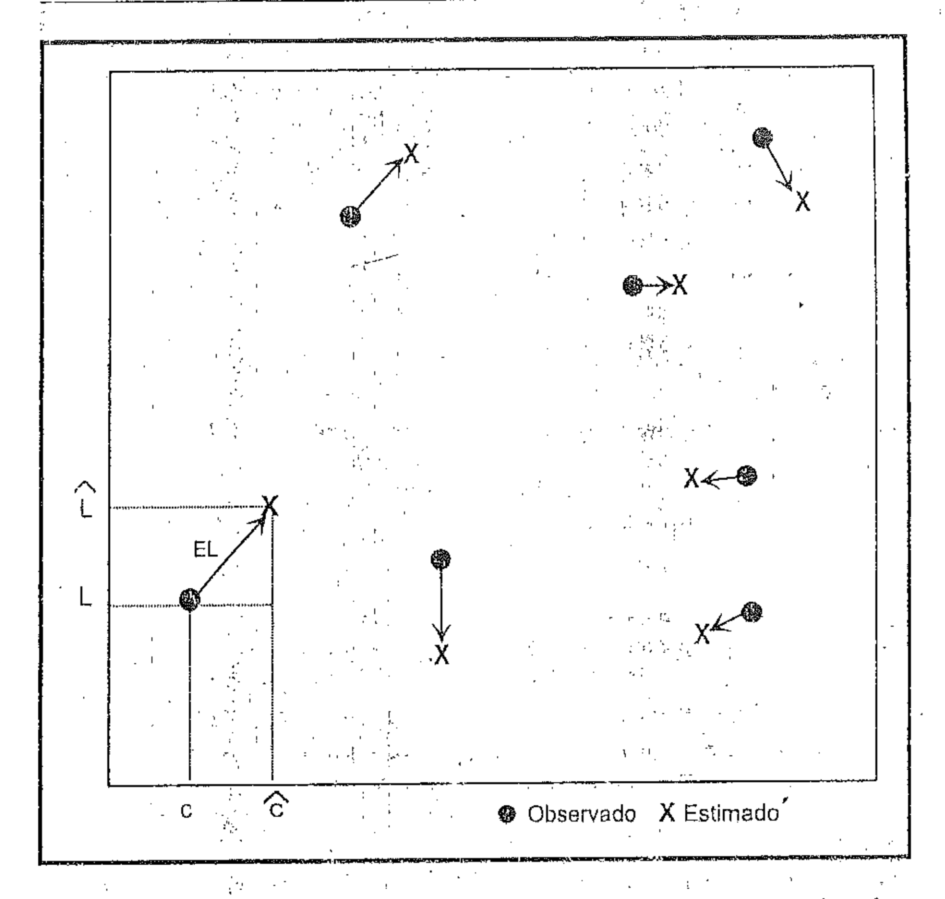


Fig. 6.26 - *El EL expresa, para cada punto, la distancia entre las coordenadas estimadas por la ecuación y las observadas en la imagen*

verificar los EL reales obtenidos en el proceso. Esto permitiría evitar el sesgo que una incorrecta distribución de puntos pudiera presentar, ya que se evalúa el error no sobre los puntos muestrales, sino sobre otros adquiridos de modo independiente al ajuste.

Para la corrección de la imagen de Madrid, teniendo en cuenta la ausencia de relieves importantes en la escena, se optó por elegir una ecuación de ajuste de primer grado, con un ELM no superior a 1 píxel (30 m). A partir de los 11 puntos de control seleccionados previamente (tabla 6.3), se obtuvieron unas funciones iniciales de transformación. El estudio de los residuales y los EL de cada punto nos permitió observar errores en la localización de algunos de ellos (tabla 6.4), ofreciéndose un ELM excesivamente elevado (2,13 píxeles). Tras corregir algunos de los errores, se optó también por eliminar dos puntos que parecían algo más conflictivos, ya que la cartografía disponible resultaba algo anticuada frente a la

Número	Columna	Columna Estimada	Residual Columna	Fila	Fila Estimada	Residual Fila	Error EL
1,00	992,00	990,65	1,35	102,00	102,16	-0,16	1,36
2,00	936,00	936,54	-0,54	195,00	194,15	0,85	1,00
3,00	923,00	924,16	-1,16	431,00	433,48	-2,48	2,74
4,00	810,00	810,75	-0,75	498,00	500,08	-2,08	2,21
5,00	651,00	650,81	0,19	456,00	454,14	1,86	1,87
6,00	652,00	652,57	-0,57	264,00	262,61	1,39	1,50
7,00	677,00	675,29	1,71	116,00	115,97	0,03	1,71
8,00	463,00	463,53	-0,53	230,00	227,55	2,45	2,51
9,00	227,00	228,86	-1,86	165,00	167,75	-2,75	3,32
10,00	253,00	251,27	1,73	510,00	511,80	-1,80	2,50
11,00	428,00	427,56	0,44	591,00	588,32	2,68	2,72

Tabla 6.4 - *Residuales de la primera corrección*

Número	Columna	Columna Estimada	Residual Columna	Fila	Fila Estimada	Residual Fila	Error EL
1,00	992,00	990,96	1,04	102,00	102,60	-0,60	1,20
2,00	936,00	936,65	-0,65	195,00	194,05	0,95	1,15
3,00	923,00	923,34	-0,34	431,00	431,33	-0,33	0,47
4,00	810,00	810,02	-0,02	498,00	497,90	0,10	0,10
5,00	651,00	650,79	0,21	453,00	453,16	-0,16	0,27
6,00	653,00	653,33	-0,33	264,00	263,31	0,69	0,76
7,00	677,00	676,56	0,44	117,00	117,85	-0,85	0,95
8,00	464,00	465,04	-1,04	230,00	229,50	0,50	1,16
10,00	253,00	252,31	0,69	512,00	512,30	-0,30	0,75

Tabla 6.4b - *Residuales de la segunda corrección*

fecha de adquisición de la imagen. Con los nueve puntos resultantes se obtuvieron las siguientes ecuaciones.

$$\hat{c} = 15.177{,}79 + 0{,}032452\,X - 0{,}006443\,Y \qquad [6.22]$$

$$\hat{l} = 147.365{,}50 - 0{,}006590\,X - 0{,}032202\,Y \qquad [6.23]$$

que ofrecieron un ajuste bastante adecuado, con un ELM de 0,76. Esto supone un error estimado en las distancias de 22,8 m, aceptable para nuestros propósitos. La tabla 6.4 recoge los residuales finales.

6.5.3.3.3. Transferencia de los ND originales a la posición corregida

Las funciones antes analizadas permiten traducir coordenadas del mapa a la imagen. Ahora bien, si pretende crearse una imagen que se corresponda adecuadamente con esas coordenadas, resulta necesario trasvasar, de alguna forma, los ND de la imagen original a esa nueva posición. Las funciones de ajuste permiten calcular la posición correcta de cada píxel, pero no originan de suyo una nueva imagen, puesto que suponen sólo un trasvase de coordenadas y no de ND. Dicho de otro modo, con estas funciones de transformación puede crearse una nueva matriz, correctamente posicionada, pero vacía. El 'llenado' de esta matriz es, precisamente, el objetivo de la última fase de la corrección geométrica.

El problema resulta más complejo de lo que pudiera pensarse a primera vista. Idealmente, cada píxel de la imagen corregida debería corresponderse a un sólo píxel en la original. Lo normal es que no sea así, sino que el píxel de la nueva imagen se sitúe entre varios de la original (fig. 6.27), ya que este proceso supone

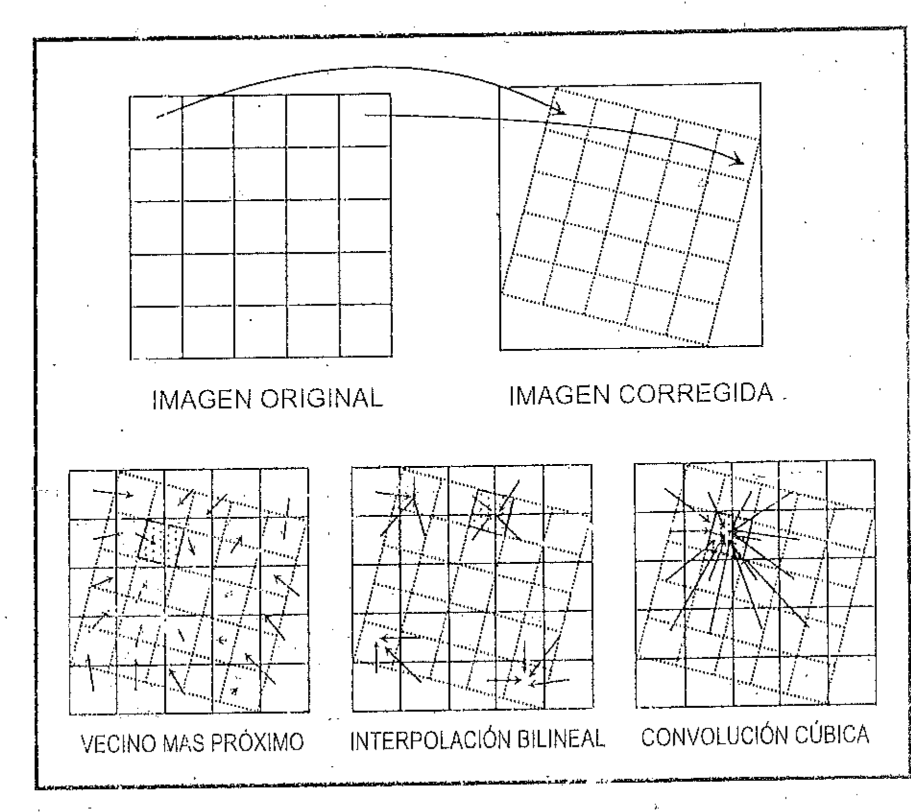


Fig. 6.27 - *Procedimientos para transferir los ND de la imagen a su posición corregida*

una alteración considerable de la geometría original de la escena. Por otra parte, puede variarse también el tamaño del píxel en la imagen corregida, haciendo aún más complejo encontrar el ND que mejor expresa el valor radiométrico originalmente detectado por el sensor.

El trasvase de ND a las coordenadas cartográficas de interés puede abordarse por tres métodos: (i) vecino más próximo, (ii) interpolación bilineal, y (iii) convolución cúbica. Simplificando las cosas pueden resumirse en dos, según almacenen un ND de la imagen original, o lo obtengan mediante una interpolación de varios ND originales.

El primer método se denomina del vecino más próximo (*nearest neighbour*), por situar en cada celdilla de la imagen corregida el ND del píxel más cercano en la imagen original. Ésta es la solución más rápida y la que supone menor transformación de los ND originales. Su principal inconveniente radica en la distorsión que introduce en rasgos lineales de la imagen (fallas, carreteras o caminos), que pueden aparecer en la corregida como líneas quebradas (fig. 6.28).

La interpolación bilineal (*bilinear interpolation*), supone promediar el ND de los cuatro píxeles más cercanos en la original. Este promedio se pondera según la distancia del píxel original al corregido: tienen una mayor influencia aquellos píxeles más cercanos en la imagen inicial. Reduce el efecto de distorsión en rasgos lineales, pero tiende a difuminar un tanto los contrastes espaciales de la imagen original.

Por último, la convolución cúbica (*cubic convolution*) considera los ND de los 16 píxeles más próximos. El efecto visual es más correcto, pero supone un volumen de cálculo mucho más elevado.

La elección entre uno de los tres métodos depende de la finalidad del proceso y de los recursos informáticos disponibles. Si pretende corregirse una imagen clasificada, el método del vecino más próximo es la elección obligada, pues es el único que preserva los valores originales al no introducir promedios (que, por otra parte, no tendrían sentido en una clasificación temática). Si, por el contrario, se pretende facilitar el análisis visual, habrá de optarse por algoritmos de interpolación más elaborados, concretamente por el de convolución cúbica si se cuenta con los recursos informáticos apropiados.

Un ejemplo del efecto causado por estos tres métodos de trasvasar los ND a la imagen corregida puede analizarse en la figura 6.28, correspondiente a la corrección de una sub-imagen de la zona de Madrid, con que venimos trabajando. Queda bien patente el efecto de los algoritmos de interpolación, especialmente en el suavizado que introducen de las áreas fronterizas: calles o

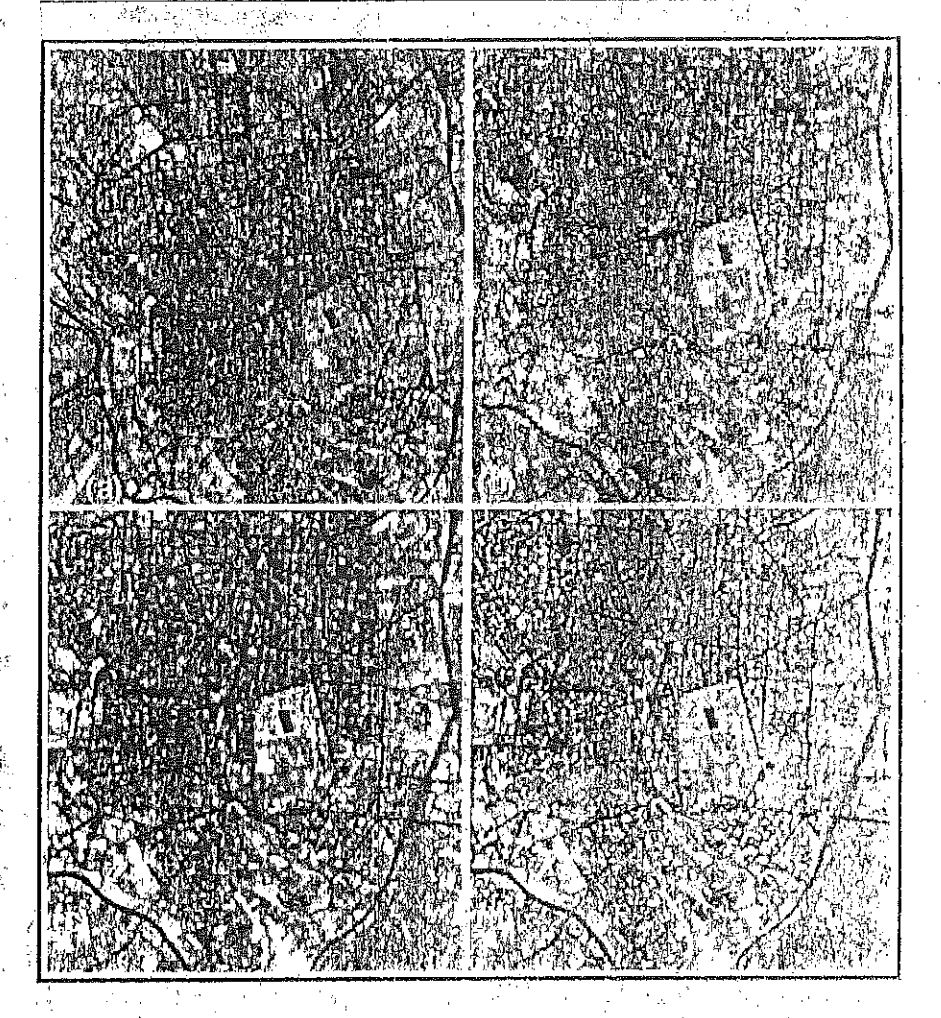


Fig. 6.28 - *Corrección digital con distintos algoritmos de interpolación: (a) Imagen original, (b) vecino más próximo, (c) interpolación bilineal, (d) convolución cúbica.*

estanque del retiro, por ejemplo, más distorsionadas en el método del vecino más próximo.

Con objeto de aclarar un poco más el proceso de interpolación, vamos a comentar con más detalle el que podría seguirse en el caso de los métodos del vecino más próximo y la interpolación bilineal.

Utilizaremos las mismas funciones de transformación en ambos casos, ya que es importante notar que el tipo de interpolación no depende del grado del ajuste en las coordenadas. Las coordenadas de cada píxel en la imagen corregida

se calculan a partir de las coordenadas del mapa, mientras su ND se estima asumiendo el ND del píxel más próximo en la original o el promedio ponderado de los cuatro más cercanos.

En pocas palabras, el proceso requiere al menos dos de los tres parámetros siguientes: coordenadas (X,Y)[5] de los vértices que definen la zona a corregir, tamaño del píxel en metros y tamaño de la imagen en columnas y líneas. En nuestro caso, se indicaron los dos primeros, señalando las siguientes coordenadas de los vértices NW (434.000, 4.480.000) y SE (449.000, 4.470.000), y como tamaño del píxel de salida 50 x 50 m.

Con estos datos, el programa opera de la forma siguiente:

(i) Estima las coordenadas, en columnas y líneas, de los vértices de la imagen corregida, a partir de las ecuaciones de ajuste. Suele comenzarse por el vértice NW, puesto que resulta el origen de la nueva imagen, usando las funciones ajustadas previamente:

$$\hat{c} = 15.177,79 + 0,032452 \times 434000 - 0,006443 \times 4480000 = 397,38$$

$$\hat{l} = 147.365,50 - 0,006590 \times 434000 - 0,032202 \times 4480000 = 240,48$$

(ii) Esas coordenadas corresponden a la columna y línea estimadas de la imagen original. A partir de ellas, puede conocerse el ND que corresponde a ese vértice eligiendo uno de los criterios antes indicados. Siguiendo el del vecino más próximo, ese ND correspondería al del píxel situado en la columna 397 y línea 240, que son los más cercanos en la imagen original.

Si utilizáramos la interpolación bilineal, el ND se obtiene por un producto ponderado de los cuatro más cercanos, de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$ND_{sal} = \frac{\Sigma_{i=1,4}(ND_i / D_i^2)}{\Sigma_{i=1,4}(1 / D_i^2)} \qquad [6.24]$$

donde D_i indica la distancia entre el píxel i y el que pretende interpolarse. En nuestro ejemplo, el ND asignado a la posición 434.000 y 4.480.000 sería un promedio ponderado de los ND correspondientes a los píxeles 397-240, 397-241, 398-240 y 398-241. La distancia D se calcularía a partir de:

$$D = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2} \qquad [6.25]$$

[5] Para evitar malinterpretaciones, cuando indicamos las coordenadas UTM de un determinado píxel nos referimos a las coordenadas de su punto central.

donde ΔX y ΔY son las diferencias entre el valor estimado y el original. Por ejemplo, para el píxel situado en las coordenadas 397-240, ΔX=0,38 y ΔY=0,48, luego D=0,612. En consecuencia, ese píxel tendría más peso en el cálculo que el situado en 398-241, que contaría con una distancia de D=0,80.

(iii) El resto de los ND de la imagen se obtienen de forma similar al indicado. Conociendo las coordenadas UTM del vértice NW de la zona y el tamaño del píxel, pueden irse calculando las coordenadas UTM del área que pretende «llenarse» con ND de la imagen original. Basta añadir a la coordenada X del vértice NW los 50 m de separación entre píxeles para obtener la siguiente coordenada X. En el caso de la coordenada Y, en lugar de sumar hay que restar el tamaño del píxel para obtener la siguiente fila de la imagen corregida, ya que las coordenadas en Y decrecen de Norte a Sur. Una vez calculadas las coordenadas UTM se introducen en las ecuaciones arriba indicadas, obteniendo la columna y fila estimada para tales coordenadas. A partir de esos valores estimados puede obtenerse el ND correspondiente a esas coordenadas. Por ejemplo, el píxel situado en la columna 220 y línea 165 de la imagen de salida, tendrá las siguientes coordenadas UTM:

$$X\,(220,165) = 434.000 + 220 \times 50 = 445.000$$

$$Y\,(220,165) = 4.480.000 - 165 \times 50 = 4.471.750$$

A partir de esas coordenadas estimamos la localización en columna y línea de la imagen original usando las fórmulas [6.22 y 6.23], obteniendo un valor estimado de columna y línea de 807,44 y 433,66, respectivamente. De ahí, deducimos que el ND del píxel 220-165 en la imagen corregida, con coordenadas UTM 445.000 y 4.471.750 tendrá asignado el ND del píxel situado en la columna 807 y línea 434 de la imagen original (empleando el criterio del vecino más próximo). Este proceso se continúa hasta que se alcanza el vértice SW de la zona designada por el usuario, momento en el cual se culmina la corrección.

El resultado final del proceso aparece en la figura 6.29. Se trata de la banda 4 de la imagen de Madrid, tras aplicar el método del vecino más próximo. Resulta patente la distorsión aplicada a la imagen original, especialmente en lo que se refiere a su orientación y tamaño.

6.5.3.4. Corrección con modelos digitales de elevación

La corrección geométrica basada en puntos de control ha sido el procedimiento más habitual para imágenes espaciales de alta resolución, Landsat o SPOT, y es el que está disponible en la mayor parte de los programas comerciales. Los

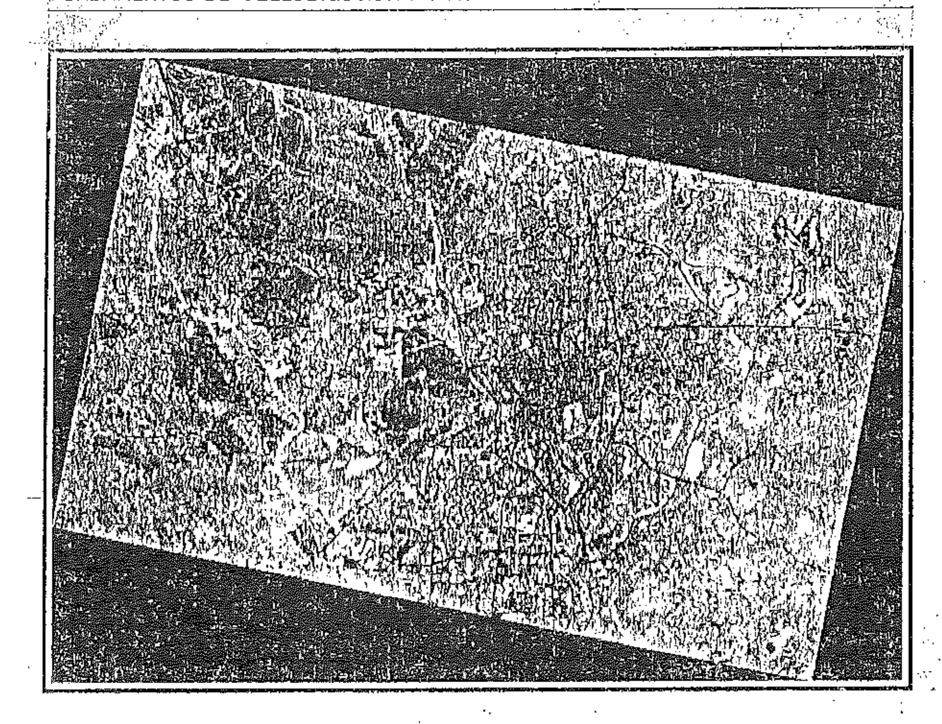


Fig. 6.29 - *Imagen de Madrid corregida a proyección UTM (banda 4)*

resultados son, en la mayor parte de los casos, suficientemente satisfactorios. Sin embargo, en el caso de trabajar sobre zonas con un relieve muy quebrado, o con imágenes aéreas, en donde las deformaciones geométricas están estrechamente ligadas al modelado del relieve, sería necesario acudir a la información topográfica. La creciente conexión entre la teledetección y los S.I.G. permite abordar estas operaciones de modo cada vez más accesible. Para realizar una corrección geométrica del efecto topográfico es preciso contar, previamente, con modelos digitales de elevación (MDE o *Digital Elevation Model*, DEM). Se trata de matrices numéricas, de formato muy similar al de una imagen de satélite, con la principal diferencia de almacenar un valor de altitud, en lugar de un valor de radiancia. En otras palabras, el ND que define cada píxel en un MDE corresponde a su altitud sobre el nivel del mar.

Supuesto que los MDE sean suficientemente precisos y estén a una resolución similar a la imagen de satélite, pueden ser de gran utilidad para su interpretación, no sólo en lo que afecta a la corrección geométrica, sino también a la calibración física y a la discriminación de ciertas categorías que pueden tener un comportamiento espectral muy similar pero una localización topográfica específica. En el campo que ahora nos atañe, la introducción de los MDE en la corrección geométrica implica habitualmente realizar una rectificación diferencial, en donde cada ND se transfiera separadamente desde la imagen

original a la resultante a partir de corregir la posición del píxel en función del desplazamiento debido al relieve (Palà y Pons, 1995). Cada coordenada X,Y,Z del MDE se transforma a la imagen mediante ecuaciones colineales, interpolando el ND de la imagen a partir de uno de los métodos antes comentados (Novak, 1992). También puede simplificarse la corrección, empleando un modelo polinómico donde la altura se introduce como una nueva variable independiente (Palà y Pons, 1995):

$$\hat{c} = a_0 + a_1X + a_2Y + a_3Z + a_4ZX + a_5ZY \qquad [6.26]$$

lo que ofrece resultados mucho mejores al ajuste lineal simple, o incluso —aunque en menor proporción— al de segundo grado, cuando el terreno es montañoso. Esta inclusión de los datos altimétricos resulta clave cuando las imágenes no se adquieren verticalmente (como puede ser el caso de las adquiridas por el SPOT), en las que los errores debidos al relieve son muy notables.

6.5.3.5. *Conveniencia de las correcciones geométricas*

Antes de terminar el presente epígrafe, conviene hacer una breve reflexión sobre la necesidad y momento de las correcciones geométricas. Tradicionalmente esta operación se ha concebido como previa e imprescindible a cualquier análisis posterior de la imagen. En los últimos años, sin embargo, se prefiere restringir estas correcciones, relegándolas, siempre que sea posible, a la fase final del trabajo, una vez que se hayan obtenido los resultados finales de la interpretación.

La razón es doble: por un lado, se reduce el tiempo de tratamiento, pues, en lugar de corregir todas las bandas originales, basta corregir una, la que contiene la imagen resultado; por otro, se aborda la clasificación con los valores originales, evitando el efecto de promedio parejo a la tercera fase del proceso de corrección. Algunos autores han estudiado la importancia de este efecto (Kovalick, 1983; Smith y Kovalick, 1985). Las conclusiones de estos trabajos aconsejan realizar la clasificación con los valores originales, si bien no se encontraron grandes pérdidas de exactitud con el empleo de las imágenes corregidas.

Pese a los comentarios previos, conviene tener presente que, en determinadas aplicaciones, las correcciones resultan un paso obligado y previo a otros tratamientos. Este es el caso de las aplicaciones cartográficas en general —y, específicamente, en lo que se refiere a la realización de mosaicos (Hord, 1982; Verhoef y Peteri, 1984)—, así como los estudios multi-temporales (7.3) o los que acudan a información auxiliar (cap. 9). En ambos casos, la precisión en el ajuste resulta un elemento fundamental, por cuanto este tipo de procesos suele abordarse por comparación, píxel a píxel, entre dos o más imágenes (o entre

imagen y mapa). Una significativa imprecisión en esta fase puede invalidar las conclusiones posteriores del trabajo (Gordon, 1980).

En resumen, puede afirmarse que las correcciones geométricas son necesarias en la mayor parte de las aplicaciones de la teledetección espacial, aunque no en todas ellas como fase previa de trabajo. Si lo que se pretende es conectar los resultados de la clasificación con otras variables geográficas, o superponer dos clasificaciones realizadas en distinta fecha, las correcciones geométricas pueden abordarse al finalizar el proceso de análisis. Ahora bien, si pretenden introducirse variables o imágenes auxiliares en la clasificación, es evidente que el registro geométrico es necesario previamente a otros tratamientos.

6.6. Realces y mejoras de la imagen

En este capítulo se consideran aquellas técnicas dirigidas hacia la mejora de la calidad visual de la imagen. Tratan de disponer mejor los datos para su análisis visual, de tal forma que sean más evidentes los rasgos de interés que presenta la imagen. Se incluyen en este apartado los procesos de mejora del contraste, composiciones coloreadas, cambios de escala, y filtrajes.

6.6.1. Ajuste del contraste

Los procesos de ajuste del contraste tienden a adaptar la resolución radiométrica de la imagen a la capacidad del monitor de visualización. Como ya vimos anteriormente (3.2.3), cada sensor codifica la radiancia recibida en un número determinado de ND, de acuerdo a las características de su diseño. Ese rango digital puede no corresponder con el número de niveles de visualización (NV) que facilita la memoria gráfica, por lo que resulta preciso ajustar, por algún procedimiento, ambos parámetros. En este sentido, caben dos situaciones obvias: (i) que el rango de ND de la imagen sea menor que el de NV facilitado por el sistema de visualización, y (ii) que la imagen presente un mayor número de ND que posibles NV. En el primer caso, se deberá aplicar una expansión del contraste original, mientras en el segundo una reducción del mismo.

La idea de contraste digital puede ilustrarse con un símil fotográfico. Una fotografía aparece con poco contraste, desvaída, cuando no existe una gran diferencia entre sus tonos más claros y más oscuros. De la misma forma, podemos definir digitalmente el contraste por relación a los ND máximo y mínimo de una imagen. Tal definición puede apoyarse en cualquiera de las medidas de dispersión comúnmente utilizadas en estadística (Schowengerdt, 1983):

$$C_1 = ND_{max} / ND_{min} \quad [6.27]$$

$$C_2 = ND_{max} - ND_{min} \quad [6.28]$$

$$C_3 = s_{ND} \quad [6.29]$$

Aquí aparecen tres definiciones digitales del contraste: el cociente entre el valor máximo y el mínimo, el rango, y la desviación típica de los ND de la imagen. A partir de estas medidas, puede juzgarse la necesidad de expandir o comprimir el contraste, en función de las capacidades de visualización ofrecidas por el sistema. Hasta el momento, el primer proceso ha sido empleado rutinariamente en la mayor parte de las aplicaciones. En cuanto a la compresión del contraste, resulta una materia de creciente interés con objeto de reducir el volumen de almacenamiento de las imágenes y aprovechar íntegramente los equipos de visualización de bajo coste. A continuación se presentan con mayor detalle ambos procesos. Se inicia ese comentario con el análisis de la técnica que permite aplicarlos operativamente: el diseño y empleo de las tablas de color.

6.6.1.1. Tablas de referencia del color

Una tabla de referencia del color (*Color Look Up Table*, CLUT), o simplemente tabla de color, es una matriz numérica que indica el nivel visual (NV) con el que se representa en pantalla cada uno de los ND de la imagen. La CLUT se inserta entre la memoria de refresco y el tubo de imagen del monitor, lo que permite modificar la relación entre el ND almacenado en disco y la intensidad de brillo con que se visualiza (NV). En consecuencia, no tiene por qué haber una equivalencia plena entre ND y NV.

En la mayor parte de los equipos de tratamiento, la CLUT es una matriz numérica de 3 columnas por 256 filas. El orden de la fila indica el ND de entrada, mientras el almacenado en la tabla expresa el nivel visual (NV), con el que ese ND será representado en pantalla. Las tres columnas corresponden a los tres colores elementales (rojo, verde y azul: fig. 6.30a).

Conviene recordar que los equipos de tratamiento digital de imágenes utilizan el proceso aditivo de formación del color (5.2.2), por lo que cuanto mayor sean los valores de NV en cada columna, mayor componente de rojo, verde o azul tendrá el píxel finalmente visualizado. Caso de que se esté manipulando una sola banda, lo normal es que la imagen aparezca en pantalla en tonos de gris. Esto significa que cada ND tiene el mismo componente de rojo, verde y azul. Un NV de 0,0,0, indica que el ND al que se aplique será visualizado como negro, mientras que 127,127,127, supone un gris medio y 255,255,255, blanco. Caso de que los

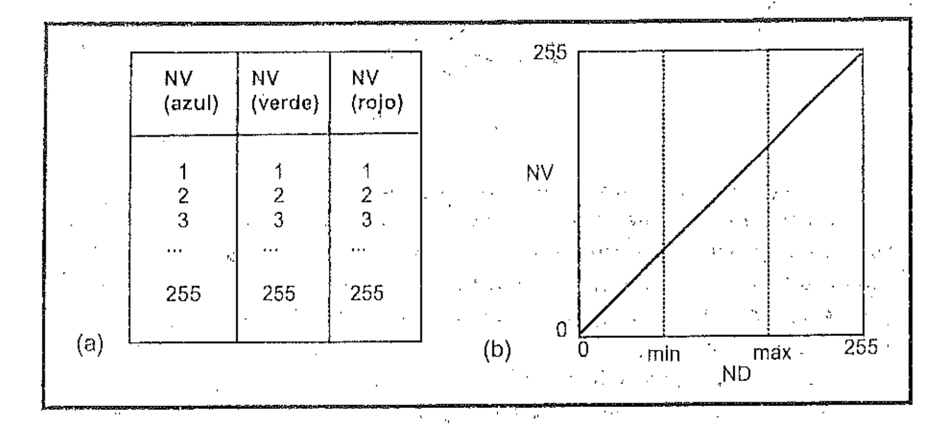


Fig. 6.30 - *Estructura tabular (a) y representación gráfica (b) de una CLUT*

tres valores sean distintos, se estará representando una imagen en color, ya sea con una o con tres bandas.

Por cuanto una CLUT implica una relación numérica entre ND y NV, ésta puede también representarse gráficamente en un diagrama bivariado, en donde el eje **X** indica el ND de la imagen, y el eje **Y** el NV almacenado en la consola. Si se visualiza la imagen original, sin ningún realce, la CLUT puede describirse gráficamente como una línea recta, que pasa por el origen 0,0 y por el máximo 255,255 (fig. 6.30b), lo que supone que el NV sea igual al ND. Con los procesos de expansión o compresión del contraste se modifica esa relación, de tal forma que los NV se distribuyan adecuadamente en el rango de la imagen.

La utilidad de estas tablas numéricas puede comprenderse fácilmente con un ejemplo. Supongamos que se pretende expandir el contraste en una imagen que presente un rango de ND entre 0 y 127. Para ajustar dicho rango al que permite el equipo de visualización (0 a 255), bastaría multiplicar por dos cada ND de entrada, lo que ampliaría su contraste a un rango entre 0 y 254. Ahora bien, tal opción conlleva dos problemas importantes: por un lado, transformar los ND iniciales para crear una nueva imagen de salida, lo que implica, o bien perder la información original, o bien aumentar las necesidades de almacenamiento; por otro lado, ese proceso supone un volumen de operaciones considerable: 786.432 multiplicaciones para una pequeña zona de 512 x 512 píxeles y tres bandas. Si consideramos que el realce es sólo una etapa intermedia, y normalmente efímera, del proceso, parece lógico buscar una alternativa a ese método. Gracias a la CLUT no es preciso transformar los ND para modificar el contraste visual de la imagen. Basta únicamente transformar la relación entre ND y NV que incluye la CLUT, de acuerdo al criterio que se estime más oportuno. En el ejemplo anterior, podría generarse una sencilla función donde NV = 2 * ND, con lo que se obtendría el mismo efecto visual que la multiplicación de todos los ND, con un considerable

ahorro de tiempo, pues la modificación de una CLUT sólo supone 768 cálculos (256 NV x 3 cañones de color), independientemente del tamaño de la imagen.

A continuación se presentan las técnicas más habituales en realce digital de imágenes. En pocas palabras, se trata de diversos procedimientos de obtener una CLUT apropiada a un fin específico: compresión o expansión del contraste, combinaciones en color multi-banda, visualización pseudo-coloreada y construcción de tablas de color de significado temático.

6.6.1.2. Compresión del contraste

En caso de que el rango del sensor supere al número de niveles de gris que pueden visualizarse en pantalla, resulta preciso comprimir los ND originales, ajustando el rango de la imagen al permitido por el terminal gráfico. Estos ajustes son necesarios en dos casos: (i) cuando se cuenta con un sistema gráfico de reducida potencia, o (ii) cuando se trabaja con un sensor de gran sensibilidad radiométrica.

Como ya se vio en 6.3.3, la mayor parte de los equipos de tratamiento digital cuentan con una resolución en pantalla de 8 bits para cada uno de los tres cañones de color (rojo, verde y azul). Esto permite visualizar una banda en 256 niveles de gris, o tres en unos 16,8 millones de tonos (=256^3). Los equipos basados sobre tarjetas de bajo coste, disponen de un número mucho menor de colores (habitualmente 256 por píxel), lo que les impide visualizar todo el rango de ND recogido originalmente por el sensor. Por esta razón, cuando se trabaja con estos equipos resulta necesario comprimir el contraste original de la imagen al número de NV disponibles. Asimismo, la compresión es precisa cuando se pretende visualizar una imagen AVHRR, codificada en 10 bits, o un MDE (16 bits), sobre un monitor gráfico que sólo admite 8 bits.

El problema puede solventarse de dos formas: eliminando una parte de la escala que no se considere relevante, o estableciendo una función de compresión de datos. La primera solución es bastante obvia, aunque poco habitual ya que supone una eliminación arbitraria de datos. La segunda puede abordarse por distintos criterios.

Lo más habitual es reducir el rango original de ND a un número conveniente de intervalos, de forma que la visualización en color resultante se asemeje en lo posible al color real. Esos intervalos suelen señalarse en función de las características de la distribución de los ND. Pueden indicarse intervalos de igual anchura, que contengan el mismo número de elementos, o que tengan unos márgenes delimitados por el intérprete. En cualquier caso, a cada uno de ellos se le asigna un sólo NV, eliminando su variación interna. Al reducirse el contraste de la

escena, la imagen aparece más empastada, reduciéndose la calidad de la visualización. No obstante, si la selección de colores es apropiada puede lograrse una visualización de bastante calidad. Para el caso de 3 bandas, resulta habitual asignar 6 niveles a cada cañón de color, con lo que la composición contará con 216 tonalidades en pantalla (6^3). Existen otros algoritmos de compresión de imagen algo más refinados, que controlan el número de intervalos asignables a cada banda de la composición en color mediante un proceso similar a la clasificación no supervisada de la imagen, que luego veremos (Muller, 1988; Baudot, 1990). Normalmente, parten de establecer una serie de particiones en el espacio tri-dimensional formado por las tres bandas que forman una composición en color. En función de la anchura del histograma de cada banda se asignan más o menos particiones por color. Para asignar un intervalo de ND a cada una de esas particiones, se establece el rango de variación más significativo en cada una de las bandas, calculado a partir de su media y desviación típica. Finalmente, se clasifican los ND de la imagen en la partición más cercana en ese espacio. El resultado del proceso es una nueva imagen, mono-banda, que se asocia a una CLUT para representar, con la mayor semejanza posible, la variación cromática de la composición multi-banda, aunque sólo precisa la tercera parte de almacenamiento.

6.6.1.3. *Expansión del contraste*

Más habituales que los procesos de compresión son las técnicas de realce del contraste, porque la mayor parte de las imágenes ofrecen un rango de ND inferior a las capacidades del equipo de visualización.

Como ya tuvimos ocasión de comentar, la mayor parte de los sensores actuales codifican la señal recibida en un rango de 256 niveles, que es el habitual en un equipo de tratamiento de imágenes. Podría pensarse, entonces, que no es necesario el ajuste entre valor numérico y valor visual, por cuanto coinciden la sensibilidad radiométrica del sensor con la del equipo de visualización. Ahora bien, ese rango máximo de ND está disponible para codificar la gran variedad de paisajes que puede detectar el sensor sobre la superficie de la Tierra, desde los de muy baja reflectividad de las zonas marinas, a los de alta reflectividad del desierto o las áreas nevadas. Lógicamente, en una sola escena casi nunca se alberga tal variedad de paisajes, por lo que el rango final de la imagen no coincide con el número de ND disponibles. Esto supone que la imagen aparezca un tanto desvaída, poco contrastada, ya que una buena parte de los 256 niveles de gris ofrecidos por el monitor quedan inactivos.

Por ejemplo, la figura 6.31a presenta la banda 3 de la imagen de Madrid, tal y como corresponde a sus ND originales. Como puede observarse, la imagen ofrece un bajo contraste, difuminándose algunas características de interés. Esta banda presenta un rango de 161 ND, con una desviación típica de 16,57. Su

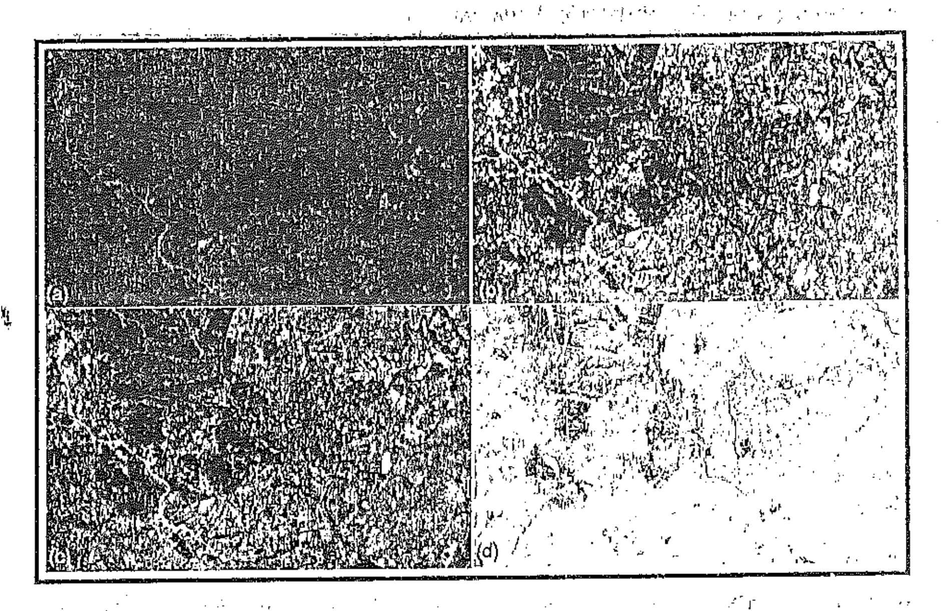


Fig. 6.31 - *Efecto de los distintos criterios de expansión del contraste: (a) imagen original (banda 2); (b) expansión lineal; (c) ecualización del histograma; (d) expansión del usuario sobre zonas forestales.*

histograma, ya recogido en la figura 6.14, ocupa sólo un pequeño sector de los 256 ND posibles, lo que confirma su reducido contraste.

De acuerdo a las ideas antes comentadas, es posible realzar ese contraste, diseñando una CLUT que haga corresponder el rango de ND presente en la imagen con el total de los NV posibles. Varios procedimientos pueden conseguir este objetivo: (i) distribuir los NV linealmente, entre el máximo y mínimo ND de la imagen (fig. 6.31b), (ii) distribuir los NV a partir del histograma de los ND originales (fig. 6.31c), y (iii) distribuir los NV en un determinado rango de interés (fig. 6.31d). Éstos son los tres procesos de expansión del contraste que a continuación se analizan. Para presentar estos realces, consideraremos una CLUT de una sola columna. Si se pretende un realce para una composición en color, se seguiría un modelo similar para expandir cada una de las bandas que la formen.

6.6.1.3.1. Expansión lineal

Es la forma más elemental de ajustar el contraste de la imagen al permitido por el equipo de visualización. Basta diseñar una CLUT en la que el ND mínimo y máximo de la imagen tengan asociados un NV de 0 y 255, respectivamente, distribuyendo linealmente el resto entre ambos márgenes. En la figura 6.31b aparece la imagen anteriormente presentada tras aplicarle una expansión lineal del contraste.

Como puede observarse, la imagen aparece ahora más nítida, mejor contrastada. Su histograma ofrece una distribución más equilibrada (fig. 6.32). Las colas del histograma se han fijado en los extremos del rango y los valores intermedios están mejor repartidos en la escala. La representación gráfica de la CLUT supone una línea de mayor pendiente que la anterior, comprendida ahora entre los ND mínimo y máximo de la imagen (fig. 6.32).

Para llevar a efecto esta transformación se precisa encontrar una función lineal, que ajuste la relación ND-NV de acuerdo a la relación antes comentada. Esa función nos permite construir una CLUT apropiada, en la que se sustituya la correspondencia NV = ND, por una nueva, en donde los NV ocupen el rango completo de visualización y no sólo el que ofrece la imagen original. En definitiva, se trata de establecer una ecuación lineal del tipo siguiente:

$$NV = s + g\,ND \qquad [6.30]$$

en donde cada NV es una función de los ND originales, tras aplicarles dos constantes, denominadas sesgo (*bias*) y ganancia (*gain*), respectivamente. Para conocer el valor de s y g, basta aplicar un sencillo sistema de ecuaciones. Ya que sabemos que el origen y el fin de los NV deben igualarse a 0 y 255, respectivamente, puede expresarse:

$$0 = s + g\,ND_{min}$$

y

$$255 = s + g\,ND_{max}$$

Sustituyendo en ambas fórmulas, los coeficientes se calculan como:

$$g = \frac{255}{ND_{max} - ND_{min}} \qquad [6.31]$$

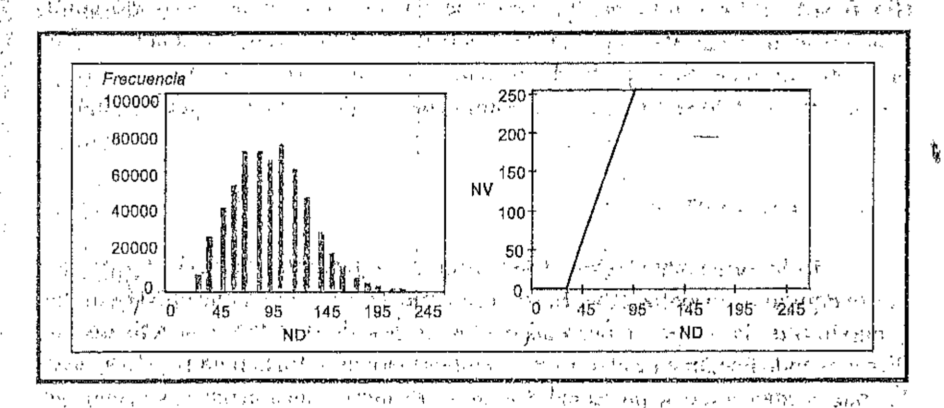


Fig. 6.32 - *Histograma y CLUT para la imagen realzada linealmente*

y

$$s = \frac{-255 * ND_{min}}{ND_{max} - ND_{min}} \qquad [6.32]$$

La transformación puede expresarse en una sólo término como:

$$NV = \frac{ND - ND_{min}}{ND_{max} - ND_{min}} * 255 \qquad [6.33]$$

pero resulta más apropiado utilizar [6.30], por ser la fórmula convencional en transformaciones lineales de datos. En lugar de ND_{max} y ND_{min}, pueden aplicarse otras medidas del rango, como los percentiles del 95 y 5 %, o un cierto número de desviaciones típicas respecto a la media.

Un ejemplo concreto puede ayudar a comprender mejor el proceso. Para obtener la expansión lineal del contraste antes presentada, se partió de las medidas estadísticas de esa banda (tabla 6.2) que sirvieron para aplicar las fórmulas anteriores. En este caso, se estableció un umbral mínimo y máximo a partir de la media ± dos desviaciones típicas. En consecuencia, el rango a expandir se sitúa entre 29 y 96 (ND). De acuerdo a [6.31 y 6.32]:

$$g = 255 / (96-29) = 3{,}806$$

y

$$s = (-255 * 29) / (96-29) = -110{,}373$$

Con estos valores puede construirse la CLUT que aparece en la tabla 6.5, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$NV = ENT\,(-110{,}373 + 3{,}806\,ND)$$

la expresión ENT indica que el resultado se redondea al entero más cercano. Además, NV = 0 cuando NV< 0, y NV=255 cuando NV>255, puesto que la tabla de color sólo puede estar formada por números enteros entre 0 y 255. Esta tabla puede representarse gráficamente, de forma similar a cualquier recta de regresión (fig. 6.32).

6.6.1.3.2. Ecualización del histograma

La expansión lineal del contraste no tiene en cuenta las características del histograma de la imagen, sino sólo sus extremos. Puede idearse una técnica de realce más depurada, en donde se considere la forma de la distribución de frecuen-

ND	NV	ND	NV	ND	NV	ND	NV
0	0	65	137	130	255	195	255
5	0	70	156	135	255	200	255
10	0	75	175	140	255	205	255
15	0	80	194	145	255	210	255
20	0	85	213	150	255	215	255
25	0	90	232	155	255	220	255
30	3	95	251	160	255	225	255
35	22	100	255	165	255	230	255
40	41	105	255	170	255	235	255
45	60	110	255	175	255	240	255
50	79	115	255	180	255	245	255
55	98	120	255	185	255	250	255
60	117	125	255	190	255	255	255

Tabla 6.5 - *Expansión lineal de la imagen de Madrid (Media ± 2 S)*

cias en los ND originales. El objetivo es generar una CLUT en la cual cada NV tenga, aproximadamente, el mismo número de ND de la imagen. Según este criterio, el NV asignado a cada ND está en proporción no sólo a este valor, sino también a su frecuencia. Aquellos ND con mayor número de píxeles serán los que, proporcionalmente, ocupen un mayor rango de visualización en el monitor. El proceso es más lento que el comentado previamente, pero ofrece mejores resultados, especialmente si la imagen original presenta una distribución gausiana.

Como puede observarse en la figura 6.31c, la ecualización del histograma ha supuesto un realce más equilibrado, mostrando menos contraste entre las zonas de alta reflectividad y las de baja. A consecuencia de este realce, el histograma de la imagen ofrece una mejor distribución de los datos (fig. 6.33). Como puede observarse, el perfil gráfico de la CLUT no es ahora lineal sino curvilíneo, asimilando al que tendría el histograma acumulado de los ND originales.

La lógica de cálculo pasa por igualar el histograma de los NV con el de los ND. Para construir una CLUT con un trazado similar al histograma de la imagen, puede seguirse el siguiente proceso (tabla 6.6):

(i) Calcular la frecuencia absoluta y acumulada de los ND de la imagen original.

(ii) Esta frecuencia se compara con una frecuencia objeto, que sería la que se obtendría si todos los NV de la imagen tuvieran la misma frecuencia (el

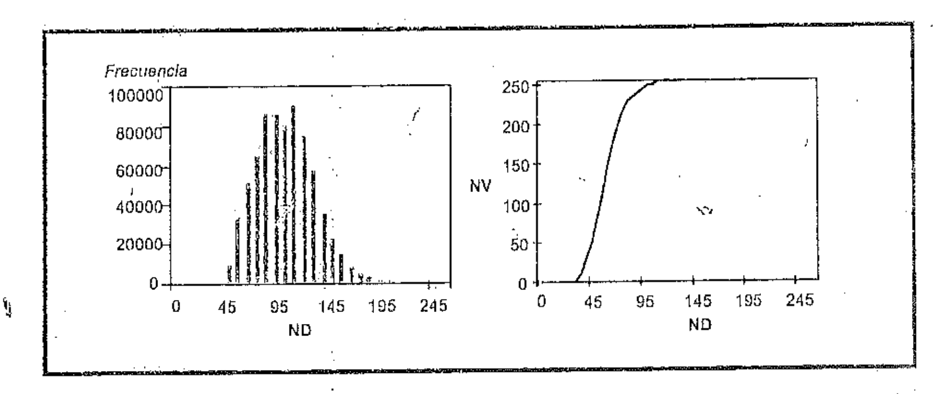


Fig. 6.33 - *Histograma y CLUT para la imagen ecualizada*

cociente entre el total de píxeles de la imagen y el número de NV posibles). En nuestro caso, la frecuencia objeto sería 736.136/256; esto es, 2875,53 píxeles por cada NV. Trabajando con frecuencias relativas, cada NV debería albergar el 0,3906 % de los píxeles de la imagen. Estos valores también se acumulan para compararlos con la frecuencia acumulada de los ND de la imagen.

(iii) De esta comparación se selecciona para cada ND el NV que presente un valor más próximo en la frecuencia objeto acumulada.

En la tabla 6.6 se incluye un resumen de los cálculos necesarios para obtener una tabla de color con expansión frecuencial. Para simplificar las cosas, hemos seleccionado únicamente rangos de 5 ND. En consecuencia, cada intervalo en la frecuencia objeto debería presentar 1,95 % de los píxeles de la imagen. Como observamos en esta tabla, el NV correspondiente a todos los ND inferiores a 25 es 0, porque su frecuencia objeto más similar es la correpondiente al NV=0 (la frecuencia acumulada de la imagen en todo ese rango es 0,056 y la frecuencia objeto acumulada es 1,95). De la misma forma, al ND=40 le corresponde el NV=30, porque su frecuencia acumulada (12,993) es más similar a la del NV=30 (13,672), y así sucesivamente hasta culminar el proceso.

6.6.1.4.3. Expansión especial del contraste

Supone un caso particular de los métodos anteriormente estudiados. La novedad radica en restringir el contraste a un rango específico de ND, en donde se manifieste con mayor claridad una cubierta de interés. Por ejemplo, en una aplicación sobre zonas marinas, convendrá resaltar especialmente la visualización de los valores más bajos del histograma, aunque se pierda contraste en otros rangos de la imagen.

ND	Frecuencia relativa	Frec. rel. acumulada	Frec. Objeto	NV	ND	Frecuencia relativa	Frec. rel. acumulada	Frec. Objeto	NV
0	0,000	0,000	1,953	0	130	0,029	99,948	52,734	255
5	0,000	0,000	3,906	0	135	0,017	99,965	54,688	255
10	0,000	0,000	5,859	0	140	0,010	99,975	56,641	255
15	0.000	0.000	7,813	0	145	0,011	99,986	58,594	255
20	0,000	0,000	9,766	0	150	0,007	99,993	60,547	255
25	0,056	0,056	11,719	0	155	0,004	99,996	62,500	255
30	1,330	1,387	13,672	0	160	0,002	99,998	64,453	255
35	4,634	6,021	15,625	10	165	0,000	99,999	66,406	255
40	6,972	12,993	17,578	30	170	0,001	99,999	68,359	255
45	8,815	21.808	19,531	50	175	0,000	100,000	70,313	255
50	11,656	33,464	21,484	80	180	0,000	100,000	72,266	255
55	11,731	45.195	23,438	110	185	0,000	100,000	74,219	255
60	10,990	56,184	25,391	140	190	0,000	100,000	76,172	255
65	12,347	68,532	27,344	170	195	0,000	100,000	78,125	255
70	10,240	78,772	29,297	195	200	0,000	100,000	80,078	255
75	7,913	86,686	31,250	215	205	0,000	100,000	82,031	255
80	4,853	91,539	33,203	230	210	0,000	100,000	83,984	255
85	3,142	94,681	35,156	235	215	0,000	100,000	85,938	255
90	2,155	96,836	37,109	240	220	0,000	100,000	87,891	255
95	1,119	97,955	39,063	245	225	0,000	100,000	89,844	255
100	0,778	98,732	41,016	250	230	0,000	100,000	91,797	255
105	0,516	99,249	42,969	250	235	0,000	100,000	93,750	255
110	0,300	99,548	44,922	255	240	0,000	100,000	95,703	255
115	0,203	99,752	46,875	255	245	0,000	100,000	97,656	255
120	0,109	99,860	48,828	255	250	0,000	100,000	99,700	255
125	0,058	99,919	50,781	255	255	0,000	100,000	100,000	255

Tabla 6.6 - *Cálculos para el realce frecuencial del contraste*

La expansión especial puede realizarse señalando un umbral máximo y mínimo, acorde con el rango digital de la cubierta que pretende realzarse (método lineal), o limitando el histograma objeto a una ventana de la imagen donde esté presente dicha cubierta. En ambos casos, esta operación supone afinar mucho más la representación visual de esa cubierta, en detrimento del contraste en otras áreas. Una muestra de este realce puede observarse en la figura 6.31d, que recoge una expansión parcial sobre las zonas forestales. Como puede observarse, queda más en evidencia la variación interna de estas cubiertas, especialmente en el caso del Monte del Pardo, sobre el que pueden observarse algunas diferencias internas apenas perceptibles en los anteriores contrastes. Centrarnos sobre ese rango implica perder definición en el resto del rango tonal de la imagen, como consecuencia de haber expandido un intervalo de visualización muy pequeño.

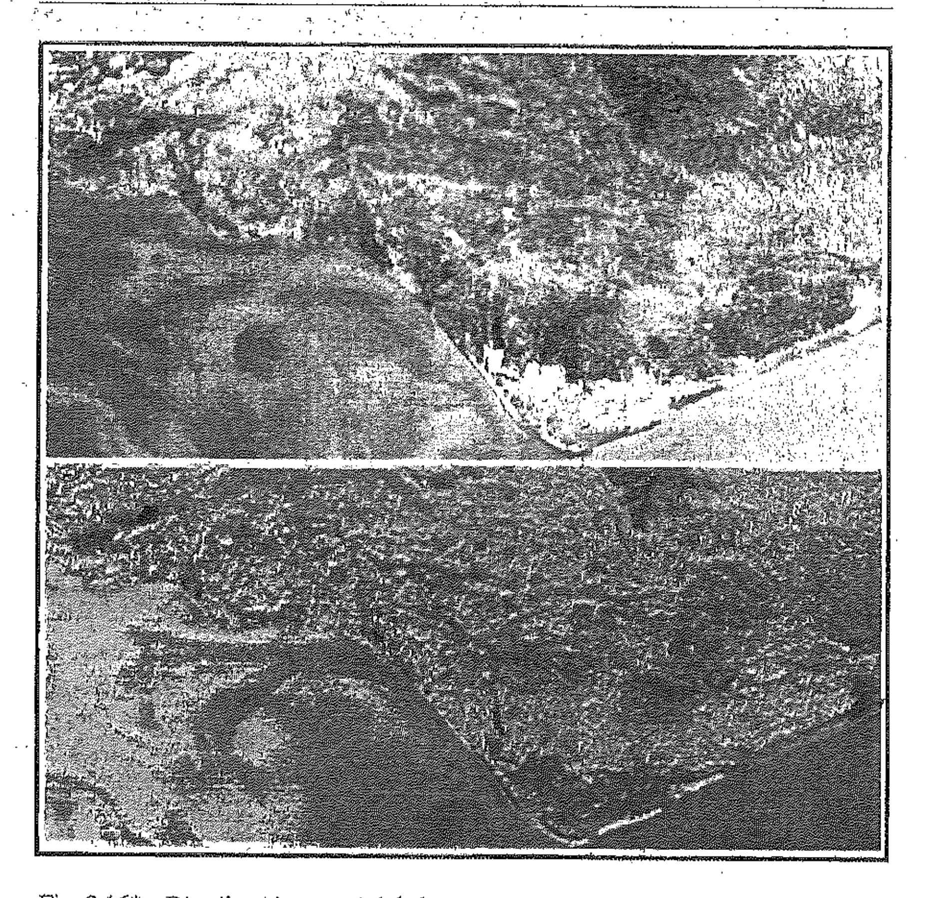


Fig. 2.16* - *Distribución espacial de la temperatura de superficie obtenida a partir de una imagen nocturna del sensor Landsat-TM. En la parte superior, valores originales; en la inferior, rangos de temperatura. Imagen adquirida el 11 de julio de 1994 sobre la costa de Faro (Portugal). Cortesía Euroimage (ESA, 1994).*

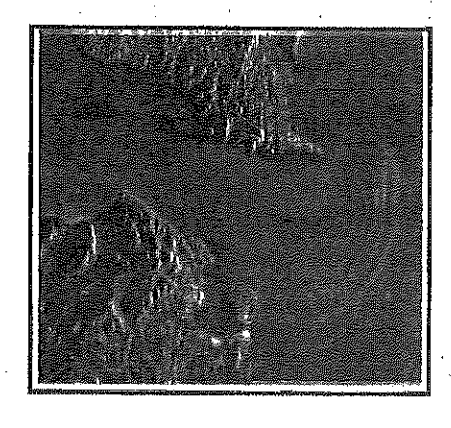


Fig. 2.21* - *Imagen ERS del Estrecho de Gibraltar. Se observan varias ondas de gran radio, provocadas por fenómenos mareales y por la distinta salinidad entre el Mediterráneo y el Atlántico (Cortesía ESA, 1992).*



Fig. 3.25* - *Mosaico de imágenes NOAA-AVHRR sobre el continente europeo*



Fig. 3.26* - *Disco visible de la Tierra en una imagen Meteosat*

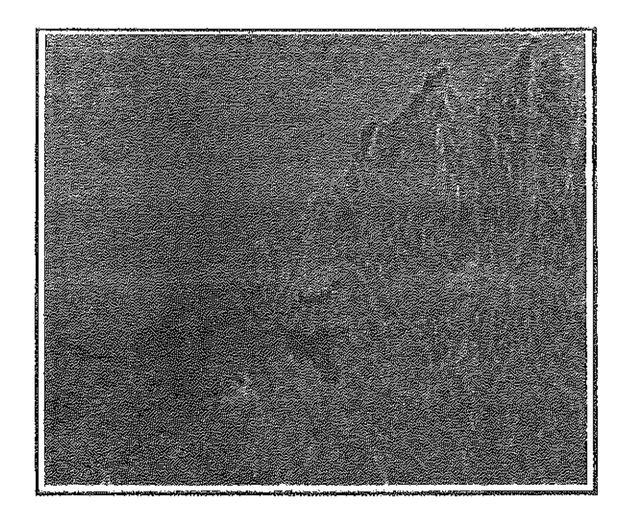


Fig. 3.30* - *Imagen ERS de las inmediaciones de la Coruña. Se muestra en tonos oscuros la mancha de petroleo producida por el naufragio del Mar Egeo en diciembre de 1992. La imagen muestra en dos tonalidades la mancha de petróleo, tal y como se observó en las imágenes del 13 de diciembre y 2 de enero (se aprecia el ritmo de regeneración del área). (Cortesía, ESA, 1993).*

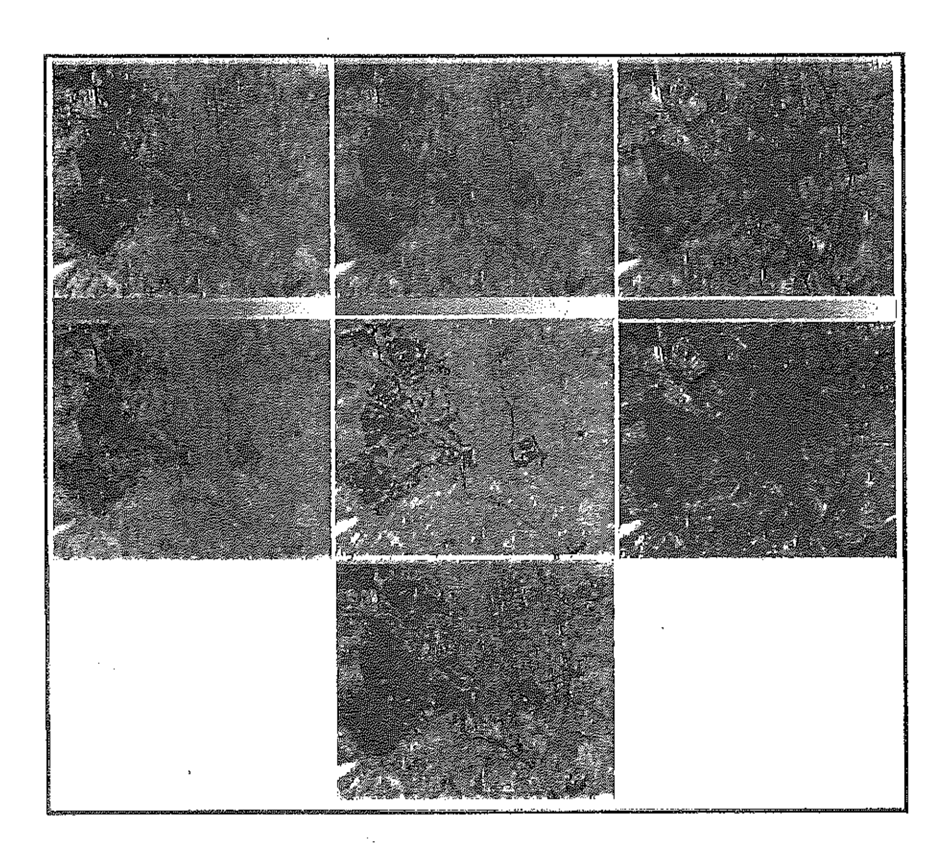


Fig. 5.6* - *Formación del color en imágenes multiespectrales*

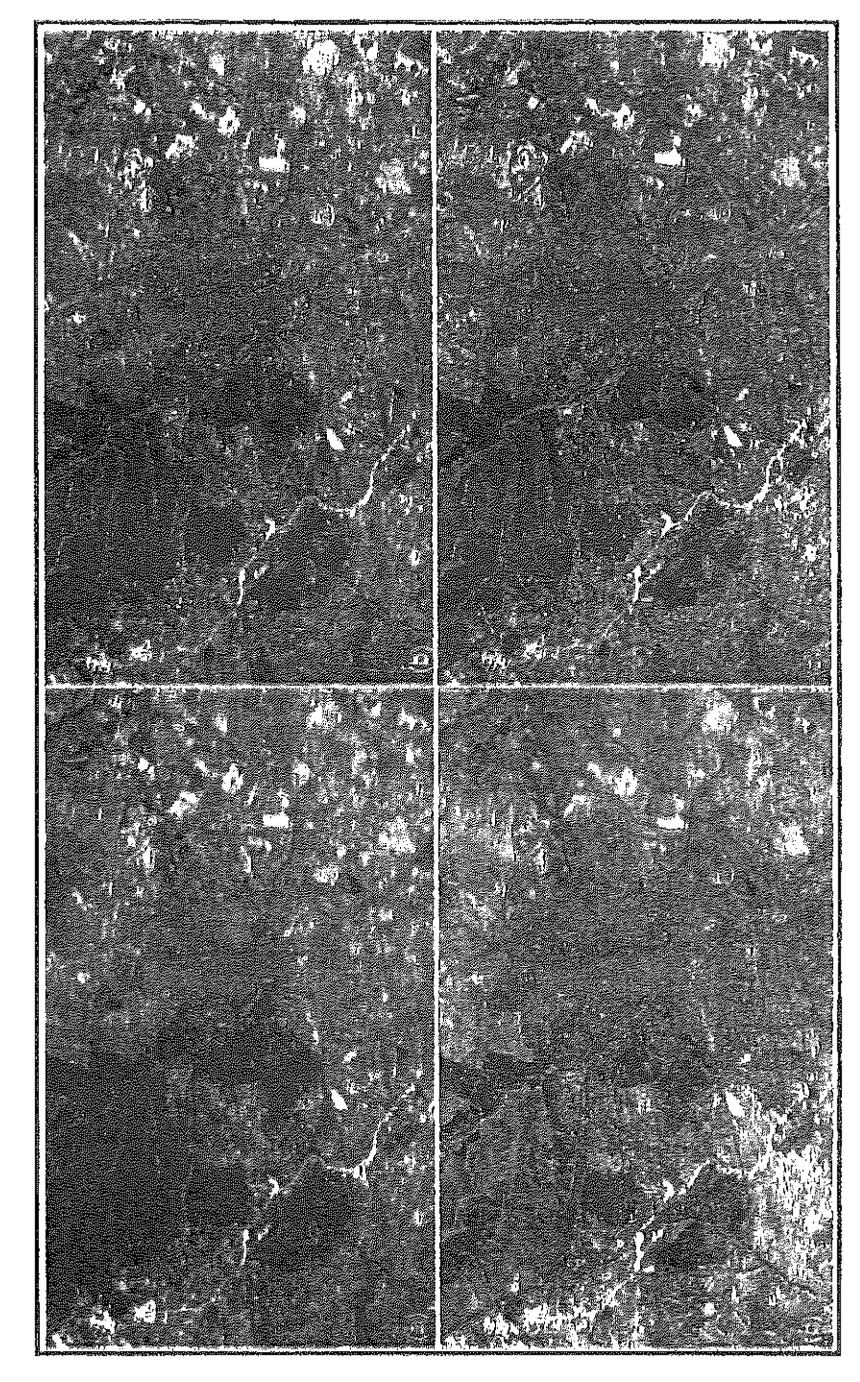


Fig. 5.8* - *Distintas composiciones en color sobre la imagen de Madrid (ver texto para detalles)*





Fig. 5.17* - *Composición en falso color de un cuarto de escena Landsat-TM correspondiente a la zona centro, adquirida en agosto de 1984.*



Fig. 5.18* - *Composición en falso color de un cuarto de escena Landsat-TM correspondiente a la zona centro, adquirida en mayo de 1985.*

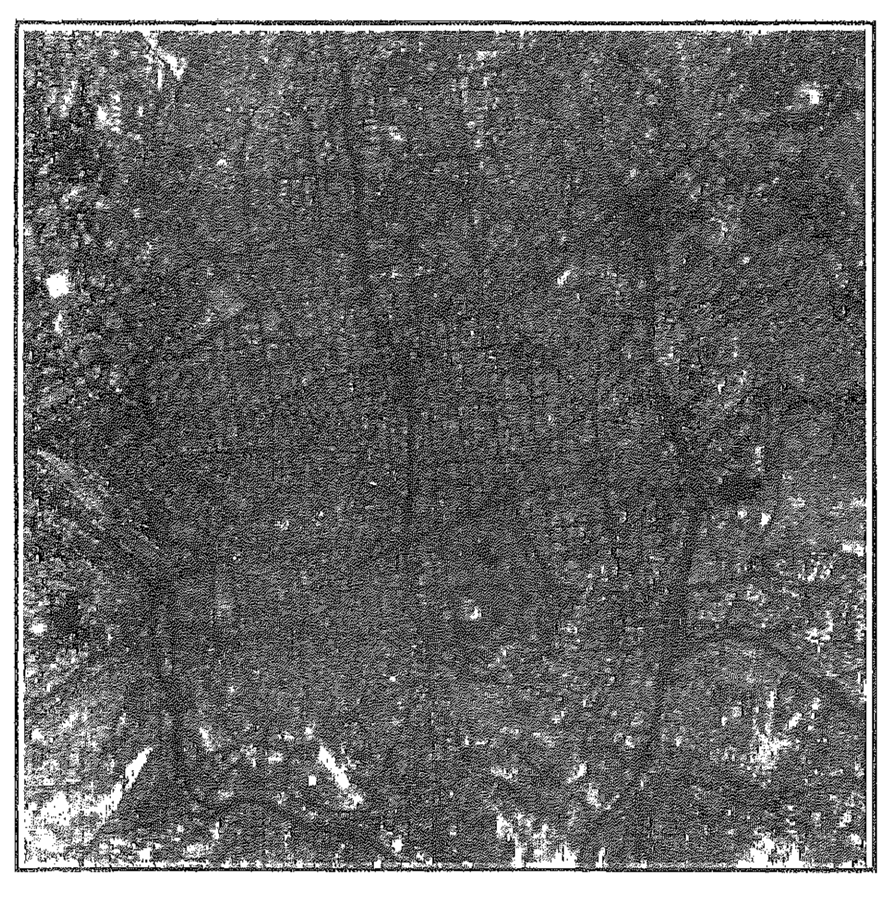


Fig. 5.23* - *Imagen en falso color del centro urbano de Madrid.*

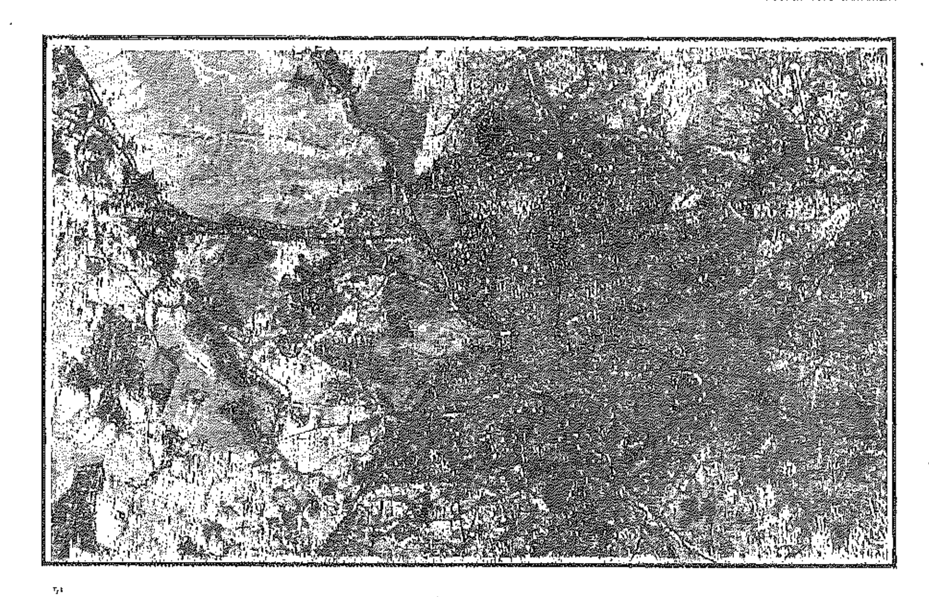


Fig. 6.37* - *Composición en color de los tres componentes HSI.*



Fig. 7.12* - *Composición en color de los componentes principales*

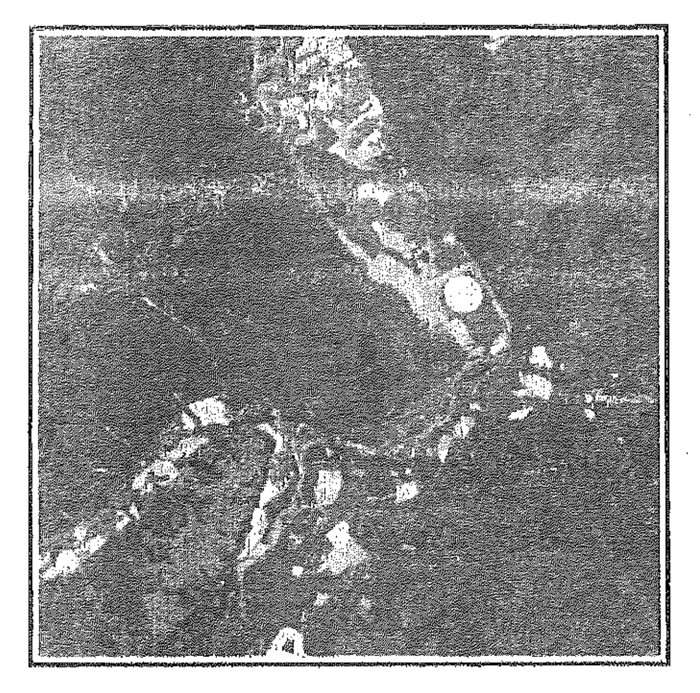


Fig. 7.16* - *Composición en color de los tres componentes TC. El cañón rojo se ha asignado al componente de brillo, el verde al verdor y el azul a la humedad.*

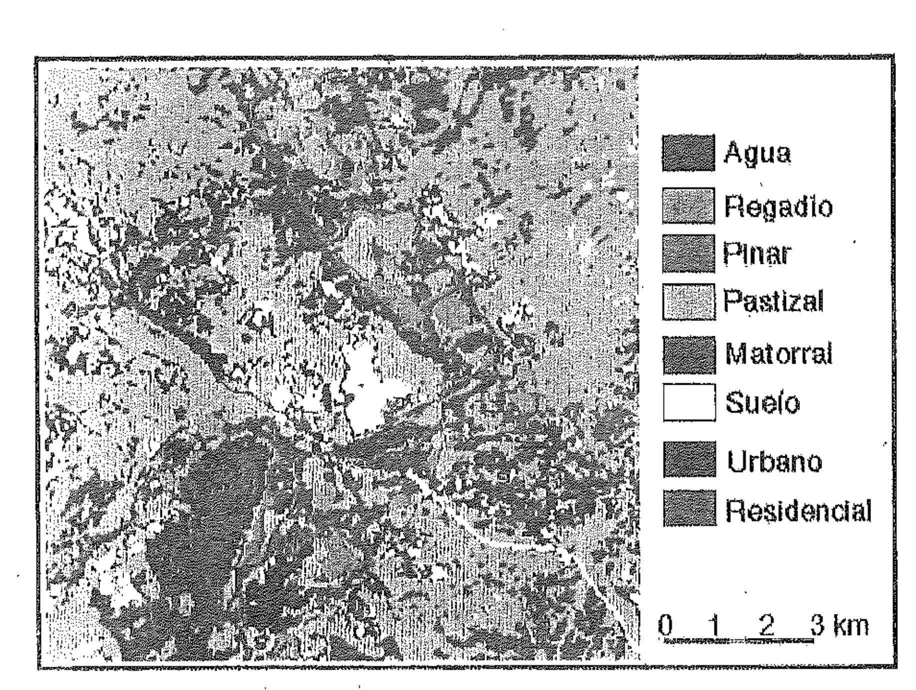


Fig. 7.37* - *Clasificación supervisada de la imagen de Arganda*

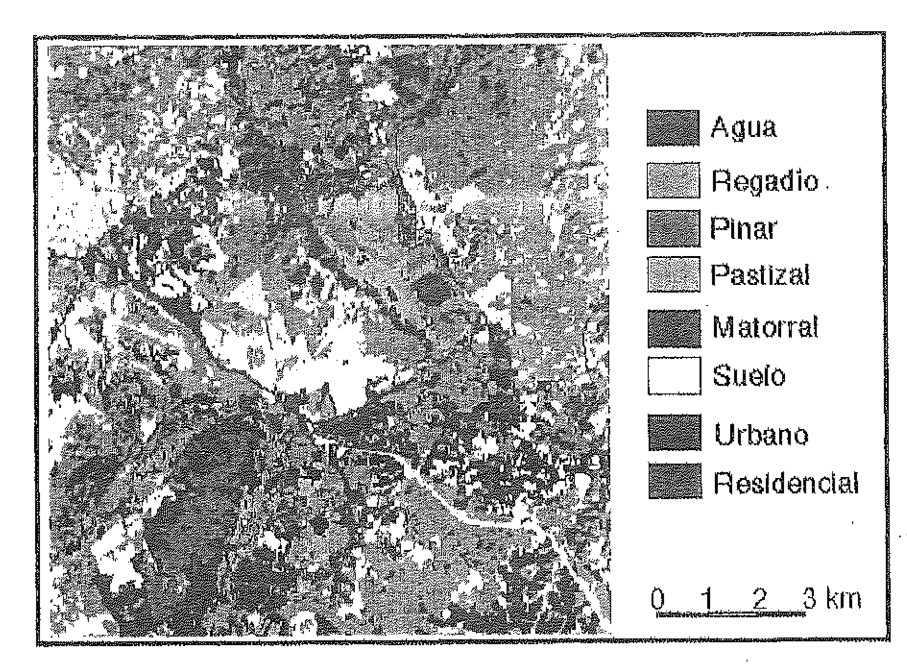


Fig. 7.38* - *Clasificación no supervisada de la imagen de Arganda*

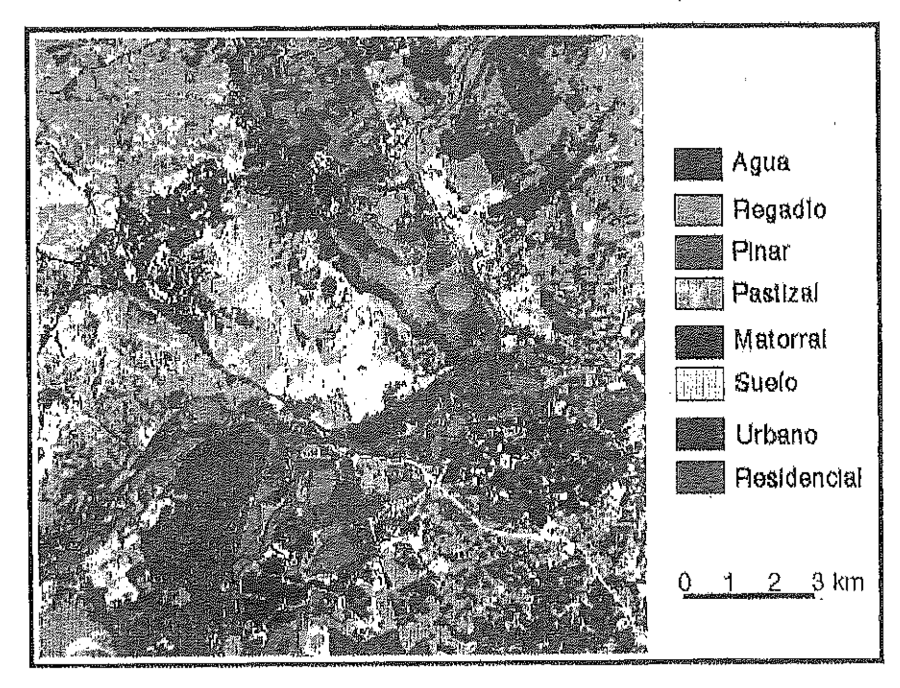


Fig. 7.43* - *Clasificación de la imagen de Arganda empleando redes neuronales*



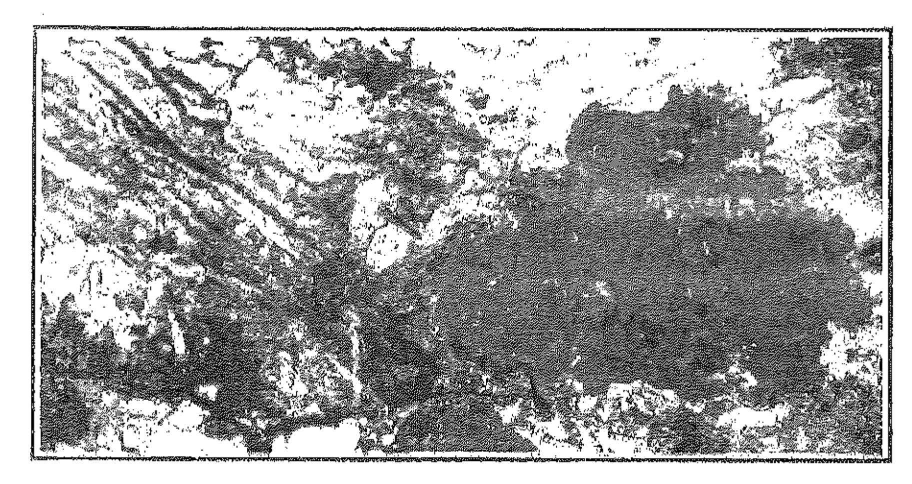


Fig. 7.47* - *Composición multi-temporal de los índices de vegetación correspondientes al incendio de Buñol. En color rojo aparecen las zonas que han perdido vigor vegetal a consecuencia del incendio.*

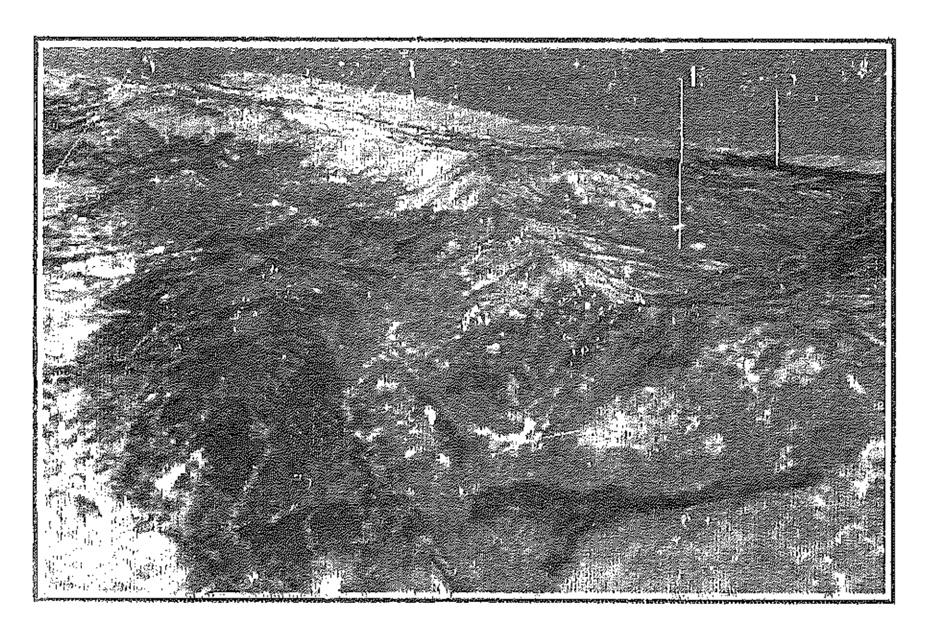


Fig. 9.2* - *Perspectiva tridimensional del área de Gredos: (1) Valle de Hiruelas, (2) Embalse de Burguillo, (3) Burgohondo, (4) Casillas, (5) Piedralaves.*

Un caso particular de este tipo de expansiones sería la binarización de la imagen. Su objeto es reducir el contraste de la imagen a dos tonos, blanco y negro, con lo que la CLUT aparece con un perfil típico de escalón. El primer «peldaño» sitúa todos los rangos que ocuparán un tono negro, y el segundo los que presentarán un tono blanco. Este tipo de procesos se utilizan para aislar un sector de ND de interés para el análisis. Por ejemplo, pueden separarse los ND correspondientes a la zona marina sobre la imagen de Buñol, señalando un valor de 1 para todos aquellos píxeles con ND por debajo de un determinado valor, y 0 para el resto. Esta imagen binarizada serviría para construir una máscara, que aislara las zonas marinas del resto, centrando sobre esa zona el resto de los tratamientos (fig. 6.34).

6.6.2. Empleo del pseudo-color

Varios autores han puesto en evidencia que el ojo humano es más capaz de distinguir tonos de color que intensidades de brillo (Jiménez y García, 1982). Por tanto, el empleo del color puede facilitar notablemente el análisis, tanto visual, como la preparación de otros tratamientos digitales. Utilizamos aquí el término pseudo-color para indicar aquellos tratamientos en donde se diseña artificiosamente una tabla de color. Como es bien sabido, una composición coloreada requiere el concurso de tres bandas espectrales, aplicadas a cada uno de los colores primarios (rojo, verde y azul). En consecuencia, una CLUT posee tres columnas, una para cada uno de esos colores. Cuando se visualiza una imagen en blanco y negro, esas tres columnas presentan el mismo valor, puesto que cada tono de gris supone una mezcla en partes iguales de los tres colores primarios.

Ahora bien, puede representarse asimismo una sola banda en distintos tonos de color. Basta, para ello, diseñar una CLUT en la que las tres columnas presenten distintos valores. En otras palabras, una CLUT que asocie el ND de una sola banda de la imagen a distintos componentes de rojo, verde y azul. Esto puede tener sentido en dos casos: (i) cuando se pretenda obtener una clave de color en una imagen clasificada, y (ii) cuando se intente realzar el análisis de una imagen, sustituyendo los niveles de gris por tonos de color.

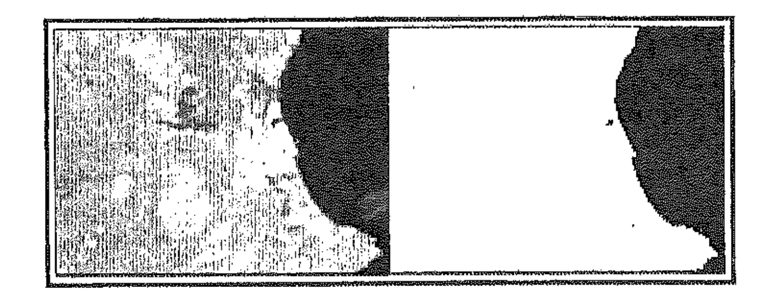


Fig. 6.34 - *Máscara binaria para aislar zonas de agua*

A modo de ejemplo, aparece en la tabla 6.7 una CLUT diseñada para representar visualmente una imagen clasificada. En ella, cada ND indica una categoría de ocupación del suelo, por lo que resulta necesario que el color finalmente representado en pantalla tenga relación con el significado de dicha cubierta. Por ejemplo, si el ND 1 indica zonas urbanas, convendrá que se visualice en color rojo, para lo que basta indicar en la CLUT, para ese valor, una intensidad máxima de rojo y una mínima de verde y azul. De la misma forma, el ND 2, que representa cubierta vegetal, se visualiza en verde, con mínimo de rojo y azul; el ND 3 hace referencia a las masas de agua, y tiene máximo de azul y mínimo de rojo y verde, y así sucesivamente hasta completar la gama requerida. La posible paleta de color se eleva a unas 16,8 millones de tonalidades, aunque, lógicamente, bastan unos cuantos colores para construir una clave de color apropiada a cualquier clasificación temática.

Cuando se visualiza una imagen monocromática en distintas tonalidades se emplea propiamente el término pseudo-color. El sentido de esta representación visual, como ya se ha dicho, es realzar el análisis de cada banda, facilitando al usuario una primera impresión sobre su interés para discriminar el fenómeno objeto de estudio. El pseudo-color puede aplicarse al conjunto de los ND de la escena, diseñando una CLUT formada, por ejemplo, por números aleatorios entre 0 y 255, para cada uno de los tres colores. Más frecuente es, sin embargo, aplicar una transformación del color progresiva, en donde la CLUT tiene una dirección determinada de progresión: por ejemplo, desde los tonos azules para los ND bajos hasta los rojos, para los más altos. Aunque esta transformación suele incorporarse en la mayor parte de los equipos de tratamiento, no existen muchas referencias sobre su aplicación práctica.

Más sentido tiene, en cambio, aplicar un color a un determinado rango de ND, de tal forma que, por un lado, se simplifica el contraste inicial en un número

ND	NV Rojo	NV Verde	NV Azul	Color
0	0	0	0	Negro
1	255	0	0	Rojo
2	0	255	0	Verde
3	0	0	255	Azul
4	0	255	255	Cian
5	255	255	0	Amarillo
6	255	127	0	Ocre
7	127	127	127	Gris
8	255	0	127	Rosa

Tabla 6.7 - *Ejemplo de CLUT para una imagen clasificada*

menor de intervalos, y, por otro, se aplica a éstos un color, más fácil de discriminar visualmente que los niveles de gris. En definitiva, se trata de establecer intervalos de densidad (*density slicing*) en cada banda. Este nombre se emplea para indicar que cada uno de esos grupos corresponde a valores de radiancia relativamente similares. Una imagen de temperaturas podría ser un buen ejemplo de esta operación. Los umbrales que definen cada intervalo pueden establecerse arbitrariamente o con algún criterio estadístico: por ejemplo, señalando una anchura constante a partir del rango, o seleccionando intervalos de la misma frecuencia. En cualquier caso, los umbrales elegidos pueden modificarse interactivamente, con lo que el usuario puede detectar, en cada banda, el rango de ND que comprende un fenómeno de interés. Asimismo, le facilita un primer balance de los solapes con otras categorías, de cara a su clasificación digital.

6.6.3. Composiciones en color

A partir de la información multi-espectral que generan la mayor parte de los sensores espaciales, pueden obtenerse distintas composiciones de color. Basta para ello aplicar cada uno de los tres colores primarios (rojo, verde y azul) a una banda distinta de la imagen, seleccionada con el criterio y en el orden que se estime más oportuno. El proceso permite visualizar, simultáneamente, imágenes de distintas regiones del espectro, lo que facilita la delimitación visual de algunas cubiertas. Por tratarse de bandas distintas, la CLUT aplicada a una composición en color presenta tres columnas con distintos valores. Normalmente, éstos se corresponden con los obtenidos en una expansión del contraste aplicada por separado a cada una de las tres bandas que intervienen en el proceso.

La elección de las bandas para realizar la composición, y el orden de los colores destinados a cada una, dependen del sensor sobre el que se trabaje y de la aplicación última del proyecto. Como ya vimos anteriormente (5.2.2), la composición más habitual es la denominada falso color, fruto de aplicar los cañones de color rojo, verde y azul sobre las bandas correspondientes al infrarrojo cercano, rojo y verde, respectivamente (fig. 5.6*). Esta composición facilita la cartografía de masas vegetales, láminas de agua, ciudades, etc., de ahí que se haya empleado profusamente en diversos estudios de análisis visual.

El sensor TM, dotado de 7 bandas espectrales, ofrece la posibilidad de realizar un amplio número de composiciones coloreadas (véase figura 5.8*). A partir de su puesta en órbita, se han desarrollado diversos métodos para seleccionar aquella que albergue un mayor contenido informativo. Se trata de identificar la composición multibanda que, entre las 35 posibles (3 de 7 bandas), recoja mejor la estructura del conjunto de la imagen. Una forma de llevar a cabo esta selección parte de retener las tres bandas con un mayor contenido de la varianza original. De esta forma se define el denominado 'Índice óptimo' (*Optimum Index Factor*, OIF):

$$OIF = \frac{\sum_{k=1,3} s_k}{\sum_{j=1,3} |r_j|} \qquad [6.34]$$

donde s_k indica la desviación típica de cada una de las tres bandas que intervienen en la composición y r_j el coeficiente de correlación entre cada par de esas mismas bandas (Jensen, 1996, pp. 97-100).

Otros métodos propuestos para seleccionar la composición en color idónea tienen en cuenta el elipsoide de máxima variación, que supone un planteamiento novedoso frente a los métodos estadísticos convencionales (Sheffield, 1985; Hord, 1986, pp. 139-47), y el valor de la divergencia (Mather, 1987, pp. 320-323), que luego comentaremos (7.2). Los resultados de estas técnicas muestran una tendencia similar. En la mayor parte de los casos, la composición elegida incluye una banda en el visible, otra en el infrarrojo cercano y otra en el medio, identificando así los tres ejes principales de variación en una imagen TM.

6.6.4. Transformación HSI

Hasta aquí hemos visto composiciones coloreadas basadas en los tres colores primarios. Una forma alternativa de representar el color atiende no a sus componentes sino a sus propiedades. Se trata de la transformación Tono, Saturación, Intensidad (HSI, *Hue, Saturation, Intensity*), de reciente empleo en teledetección, pero que ya ha mostrado su interés para aplicaciones geológicas (Terhalle y Bodechtel, 1986) y para combinar imágenes adquiridas por distintos sensores (Blom y Daily, 1982; Chavez, 1986; Carper et al., 1990; Chavez et al., 1991)

El tono procede de la longitud de onda en donde se produce la máxima reflectividad del objeto: equivale al color que aprecian nuestros ojos. La saturación refiere a la pureza de dicho color, su grado de mezcla con los otros colores primarios. Por último, la intensidad puede identificarse con brillo, en función del porcentaje de reflectividad recibido.

Es posible transformar las coordenadas de la imagen de los colores primarios (RGB) a las propiedades del color (HSI). En el primer caso, cada píxel puede representarse en un diagrama tridimensional (correspondiente a los tres colores primarios: rojo, verde y azul). En el segundo, por un hexácono, en donde la cara hexagonal sería el tono, el eje vertical la saturación, y la distancia al eje vertical la intensidad (fig 6.35). La transformación entre coordenadas RGB y HSI puede abordarse gracias a distintos algoritmos de conversión (Pellemans et al., 1993). En primer lugar es necesario partir de una combinación de bandas determinada, que se convertirá a las coordenadas HSI. Denominaremos ND_r, ND_v y ND_a a los

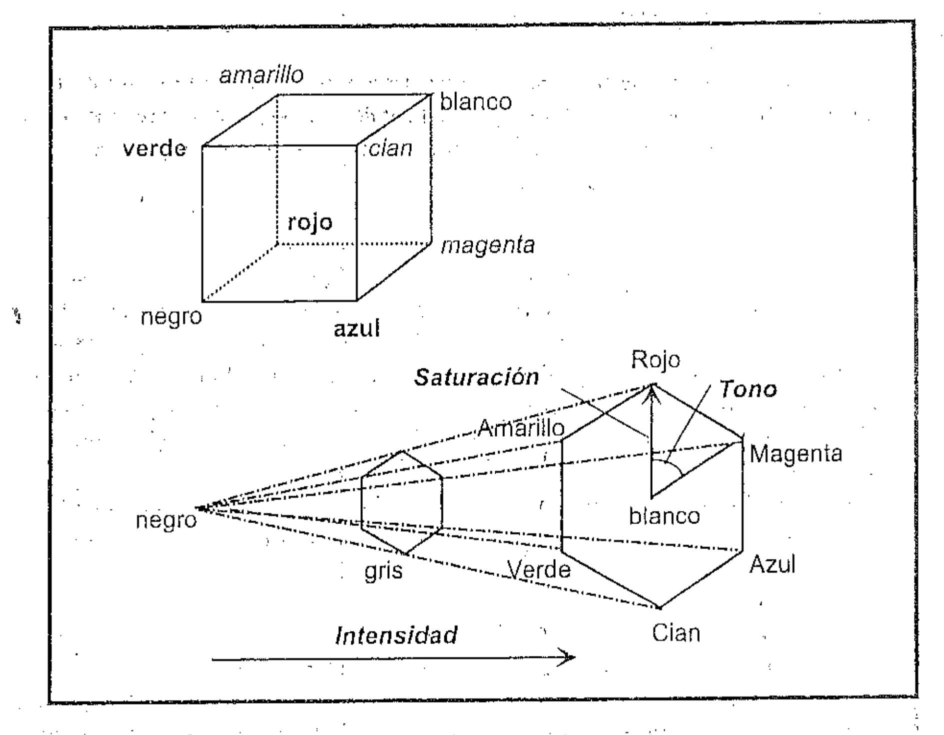


Fig. 6.35 - *Representación gráfica del color a partir de las coordenadas RGB y HSI*

ND asignados a los colores rojo, verde y azul, respectivamente. A partir de ellos se calcula la Intensidad (I) como la media de los tres[6]:

$$I = \frac{ND_r + ND_v + ND_a}{3} \qquad [6.35]$$

el tono como:

$$T = \arctan\left(\frac{2ND_a - ND_v - ND_r}{\sqrt{3}(ND_v - ND_r)}\right) + C \qquad [6.36]$$

donde:

$$C = 0, \text{ si } ND_v \geq ND_r$$

$$C = \pi, \text{ si } ND_v < ND_r$$

y la saturación como:

$$S = \frac{\sqrt{6}}{3}\sqrt{ND_a^2 + ND_v^2 + ND_r^2 - ND_a ND_v - ND_a ND_r - ND_v ND_r} \qquad [6.37]$$

[6] En Mather (1987, p. 230) puede estudiarse otro método para obtener los componentes de esta transformación.

Como ya comentamos, la transformación HSI ha sido bastante utilizada con fines geológicos. Por ejemplo, Terhalle y Bodechtel (1986) ilustran el uso de esta transformación para la cartografía de rasgos morfológicos en zonas áridas.

Sin embargo, donde ha tenido más desarrollo es en la fusión de imágenes entre sensores de distinta resolución espacial. El objetivo de estas técnicas es complementar la información espectral de un sensor como el Landsat-TM o el SPOT-XS con la información facilitada por el canal pancromático del SPOT, de tal forma que se mejore notablemente el detalle espacial de la imagen resultante. Las primeras fusiones entre datos pancromáticos y multiespectrales se basaron, casi exclusivamente, en la transformación HSI; sin embargo, en los últimos años se ha criticado la conveniencia de emplear esta técnica, proponiendo otras que no violentan tanto las características espectrales originales. No obstante, incluimos aquí el esquema sobre cómo se abordaría esa fusión entre datos de distintos sensores.

En primer lugar, es necesario que las imágenes multiespectrales y pancromáticas se rectifiquen geométricamente, de tal forma que puedan superponerse con precisión. En esa corrección, la imagen TM (o la SPOT multiespectral) se amplía a un píxel de 10 m, para igualar el tamaño del píxel SPOT pancromático. A continuación, la composición coloreada de la imagen TM se transforma a los componentes HSI. Por cuanto el tono y la saturación refieren al contenido espectral de la imagen, mientras la intensidad se relaciona más con el componente espacial, basta sustituir este último componente por la imagen SPOT pancromática, de tal forma que se incorpore el detalle espacial de ésta sin perder la resolución espectral del TM. Por último, se aplica la transformación inversa, de componentes HSI a RGB, obteniéndose un producto visual muy mejorado. Similares experiencias podrían abordarse entre imágenes multiespectrales Landsat o SPOT y otros sensores monocromáticos, como las imágenes radar (Harris et al., 1990) o incluso ortofotos.

Como decíamos anteriormente, este esquema para la fusión de imágenes se ha puesto en tela de juicio recientemente, al comprobarse que, cuando se realiza una composición en falso color, el canal pancromático del SPOT no está bien correlacionado con el componente Intensidad (Carper et al., 1990; Chavez et al., 1991; Pellemans et al., 1993). En consecuencia, se proponen utilizar otras técnicas para la fusión. Entre ellas destacan las siguientes:

(i) una integración ponderada entre el canal pancromático y el canal infrarrojo cercano:

$$M_p = \frac{2Pan + ND_{ir}}{3} \qquad [6.38]$$

el resultado se sustituye por el componente Intensidad.

(ii) una suma ponderada del pancromático con los canales multiespectrales, aplicando previamente un filtro de paso alto (ver 6.6.5) para realzar el componente espacial de la imagen pancromática (Chavez et al., 1991).

(iii) una sustitución selectiva del pancromático por los bandas espectrales verde y roja, tras aplicarle unas correcciones radiométricas para reducir las diferencias de calibración entre bandas (Pellemans et al., 1993).

Un ejemplo de transformación HSI puede analizarse en las figuras 6.36 y 6.37* correspondientes a la imagen de Madrid. La composición original corresponde a un falso color mejorado (TM 4/5/3), a partir del cual se han generado los tres componentes físicos: Tono, Saturación e Intensidad, más una combinación coloreada de los tres componentes. La imagen del Tono ofrece los valores más altos para la superficie urbana y el agua, lo que indica que el color dominante de la imagen original corresponde a las superficies más reflectivas en las bandas 3 y 5. La correspondiente a Saturación muestra también valores altos para el agua, mientras la ciudad y suelos desnudos aparecen en grises oscuros o negros. La vegetación ofrece valores altos en este componente, como consecuencia de su clara cromaticidad. En cuanto a la imagen de la Intensidad, aísla el componente más brillante de las tres bandas; esto es, el ND máximo de las tres para cada píxel. En consecuencia, los suelos desnudos presentan los valores más altos, junto a la vegetación muy vigorosa o las superficies pavimentadas (aeropuerto de Barajas) o en construcción (polígono del Vandel, junto a la M-40).

La composición coloreada de los tres componentes —representados en color rojo, el tono; verde, la saturación, y azul, la intensidad (fig. 6.37*)— ofrece una representación original de la información almacenada en las bandas 4, 5 y 3. La vegetación ofrece una clara tonalidad verde (mayor saturación). El agua, por su parte, presenta tonos cian (saturación + tono), mientras las zonas urbanas ofrecen tintes rojos (tono), y los suelos desnudos recogen tonalidades cian o magenta (intensidad + tono).

6.6.5. Filtrajes

6.6.5.1. Naturaleza de un filtro digital

Al igual que en las técnicas fotográficas convencionales, el filtro se aplica en análisis digital para aislar componentes de interés. Hemos visto previamente técnicas que mejoran el contraste tonal en la imagen, esto es, la diferencia entre los valores más oscuros y más claros que se visualizan en el monitor. El otro componente de la imagen es el contraste espacial, o si se prefiere la diferencia entre el ND de un determinado píxel y el de sus vecinos. Mediante técnicas de filtraje, se pretende suavizar o reforzar estos contrastes espaciales, de tal forma

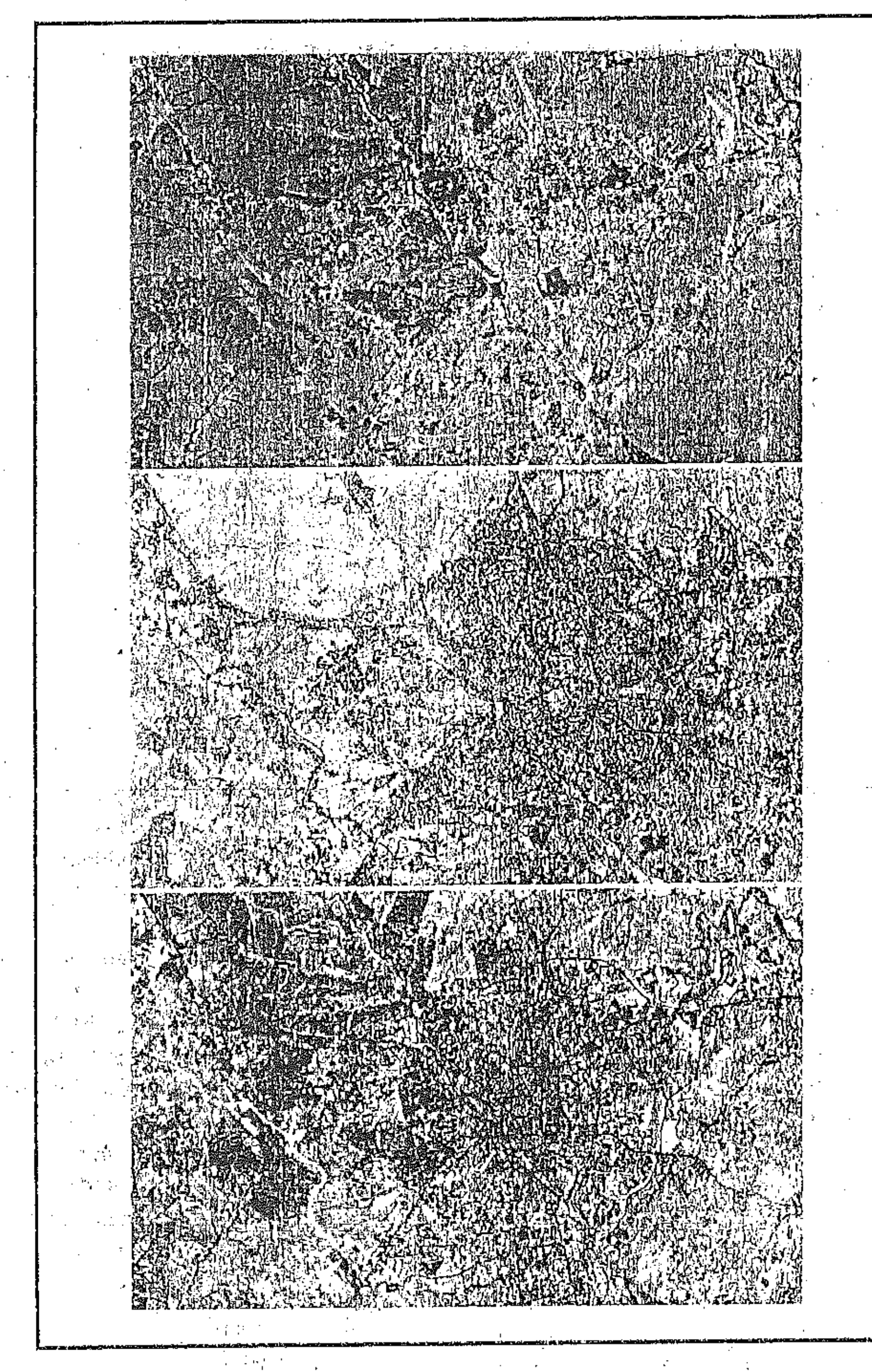


Fig. 6.36 - *Imagen correspondiente a los componentes HSI de la composición en Falso Color: (a) tono, (b) saturación, (c) intensidad.*

que los ND de la imagen se asemejen o diferencien más de los correspondientes a los píxeles que les rodean.

Si trazamos un perfil radiométrico en una determinada zona de la imagen (fig. 6.38) observamos numerosos picos y valles, a consecuencia de cambios bruscos en las características radiométricas de la cubierta del suelo. Como en cualquier serie temporal, esa línea podría considerarse como una suma de dos componentes: las bajas frecuencias, que indican la tendencia general de la variación, y las altas frecuencias, que señalan los contrastes más agudos. El propósito de los filtros digitales es retener unas u otras, en función del objetivo que persiga el intérprete. Se denominan, respectivamente, filtros de paso bajo y paso alto. Hay dos procedimientos para llevarlos a cabo: aplicar a todos los píxeles de la imagen una operación aritmética que tenga en cuenta el valor de los inmediatos (filtros en el dominio espacial), o retener ciertos componentes de la frecuencias de la imagen (filtros en el dominio de la frecuencia). Los primeros resultan bastante sencillos de comprender y aplicar, mientras los segundos requieren un aparato matemático que excede el contenido de este manual. Baste aquí decir que se basan en una técnica conocida como transformadas de Fourier, que convierte una imagen en una función bidimensional con dos componentes de frecuencia (horizontal y verti-

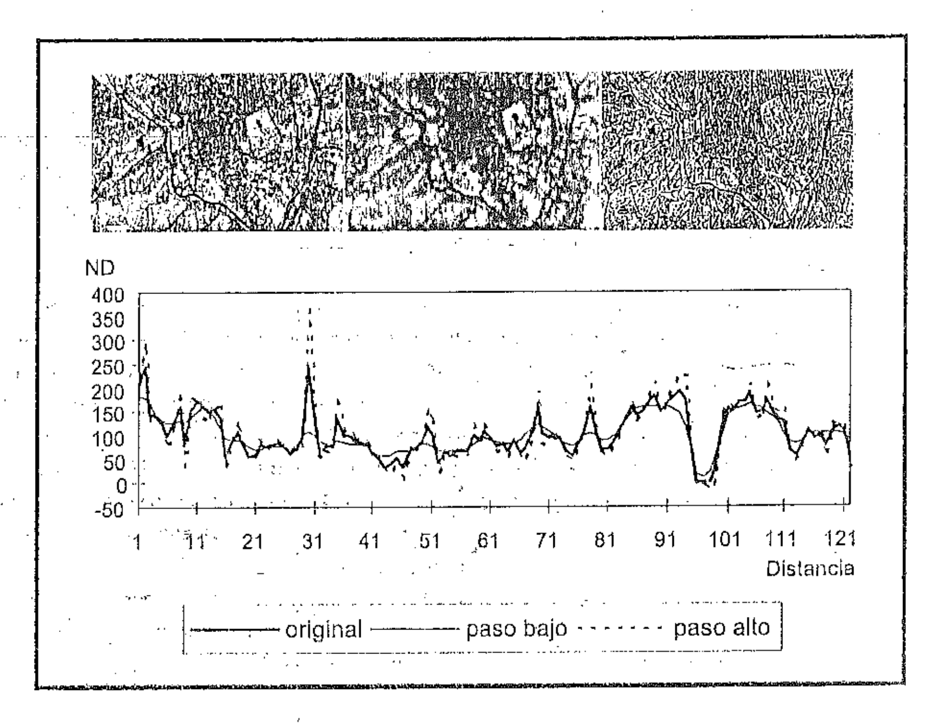


Fig. 6.38 - *Perfil radiométrico de la imagen original (izquierda) y las filtradas (centro y derecha)*

cal), asumiendo que la variación de los ND en la imagen puede aproximarse a una función continua compleja. Aplicada la transformación, se obtienen los espectros de Fourier, que representan los componentes de fase y amplitud que definen una determinada imagen. Sobre ese espectro pueden aplicarse ciertos filtros y correcciones, especialmente valiosas cuando se trata de ruidos sistemáticos (por ejemplo un bandeado) pues aparecerán en una determinada dirección de la frecuencia (Lillesand y Kiefer, 1994; Jensen, 1996). Una vez realizada la modificación, puede retornarse al dominio de la imagen aplicando una transformada de Fourier inversa[7].

Hemos incluido los filtros digitales en este capítulo, porque las técnicas de filtraje se dirigen, directamente, al realce visual de la imagen. Al igual que las operaciones antes comentadas, pretenden mejorar la visualización de las imágenes, ya sea para eliminar valores anómalos, ya para resaltar rasgos lineales de interés. Sin embargo, a diferencia de las operaciones ya comentadas, el filtraje implica modificar los ND originales, y no sólo la forma en que se representan visualmente. En otras palabras, no se trata sólo de transformar los NV almacenados en las CLUT, sino también los mismos ND de la imagen. Por tanto, si pretende abordarse una clasificación digital, las imágenes filtradas no resultan, en principio, muy convenientes, aunque refuercen visualmente rasgos de interés respecto a la imagen original.

Suelen distinguirse dos tipos de filtros de acuerdo al objetivo que se persiga: (i) filtros de paso bajo (*low pass filtering*), que tienden a destacar el componente de homogeneidad en la imagen, subrayando aquellas áreas donde la frecuencia de cambio es baja, y (ii) filtros de paso alto (*high pass filtering*), dirigidos a los componentes de alta frecuencia: esto es, a aquellas áreas de alta variabilidad, donde el contraste espacial es intenso.

Ambos tipos de filtrado pueden abordarse con el mismo método. Si el objetivo último es poner a los píxeles de la imagen en relación con sus vecinos (ya sea para homogeneizarlos, ya para diferenciarlos), basta realizar una serie de operaciones aritméticas entre cada uno de ellos y sus inmediatos. La forma concreta de efectuar este proceso es aplicar sobre los ND originales una matriz móvil de coeficientes de filtraje (CF). Esta matriz (denominada, por algunos autores, *kernel*) puede tener un tamaño variable, en función del número de píxeles vecinos que queramos implicar en el proceso. Lo habitual es que se trate de una matriz de 3 x 3 CF, que se aplica sucesivamente a todos los píxeles de la imagen. Puede también disponerse de matrices de filtraje mayores, de 5 x 5 ó 7 x 7 píxeles. Cuanto mayor sea ésta, el efecto de suavizado o realce espacial es más intenso, al considerar como vecinos un mayor número de píxeles.

[7] Una discusión, bastante detallada, del fundamento y aplicaciones a la teledetección de la transformada de Fourier puede analizarse en Richards (1993, cap. 7).

En cualquier caso, la matriz de CF se aplica sucesivamente a la imagen original, desplazándose hacia la derecha tras calcular el nuevo valor del píxel central, que es el único que se modifica en cada desplazamiento. El siguiente cálculo, sin embargo, se obtiene de los ND originales, y no de los ND ya filtrados, con objeto de que toda la imagen tenga la misma función de filtrado.

El resultado de un filtro digital depende de los CF señalados por el usuario. Si éstos tienden a ponderar el valor central en detrimento de los circundantes, el píxel refuerza sus diferencias frente a los vecinos. Por el contrario, si los coeficientes favorecen a los píxeles periféricos, el central se asemejará más a los adyacentes. Obvia decir que en el primer caso nos encontraríamos ante un filtro de paso alto, mientras en el segundo sería de paso bajo.

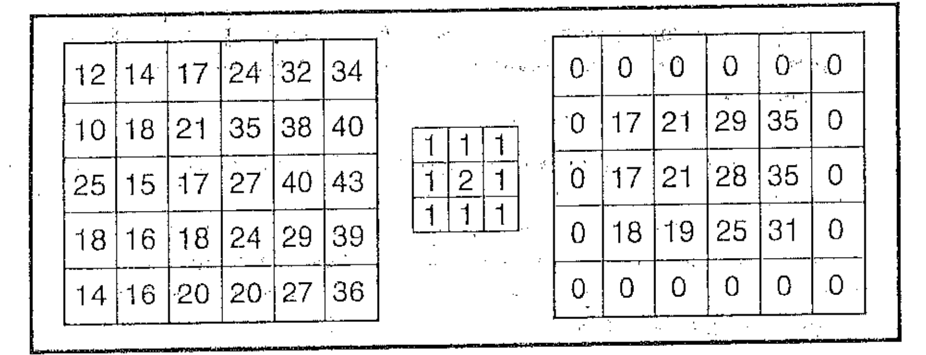
En suma, el procedimiento matemático del filtraje consiste en relacionar cada píxel con sus vecinos, de acuerdo a unos coeficientes determinados por el usuario. En el caso de una matriz de 3 x 3 CF, la fórmula para obtener el ND filtrado sería (Mather, 1987):

$$ND'_{i,j} = \frac{\sum_{p=-1,1}\sum_{q=-1,1} ND_{i+p,j+q}\, CF_{f+p,c+q}}{\sum_{p=-1,1}\sum_{q=-1,1} CF_{f+p,c+q}} \qquad [6.39]$$

en donde $ND_{i,j}$ indica el ND original del píxel i,j; $ND'_{i,j}$ el ND de salida para ese mismo píxel; CF, el coeficiente de filtraje correspondiente, y f y c la fila y columna central de la matriz de filtraje. El resultado de esta fórmula se aproxima al entero más cercano. Otros autores proponen dividir el numerador por el número de píxeles de la ventana de filtrado (9 si se trata de 3 x 3), independientemente de los CF que se señalen.

El proceso abordado en un filtraje puede ilustrarse con un sencillo ejemplo. Se pretende aplicar un filtro de paso bajo a una pequeña imagen de 5 x 6 píxeles, empleando la fórmula anterior sobre una matriz de 3 x 3 CF (fig. 6.39). La observación del resultado permite extraer algunas consideraciones de interés. En primer lugar, se constata que el área filtrada se limita a los píxeles centrales. Los píxeles de borde no se afectan por el proceso, puesto que no tienen los 8 vecinos necesarios para realizar el cálculo. Esta característica es común a cualquier filtraje, ya sea de paso alto o bajo. Obviamente, en el caso de una imagen de mayor tamaño (512 x 512 píxeles, por ejemplo), la pérdida de esos píxeles de borde no supone una grave inconveniencia[8]. Otros autores prefieren aplicar algún promedio especial a estos píxeles, en lugar de igualarlos a cero.

[8] En una matriz de filtraje de 3 x 3 se pierden la primera y última fila y columna. Si empleamos matrices de mayor tamaño, la merma será más significativa: con 5 x 5, se perderían las dos primeras y últimas; con 7 x 7 las tres, etc.



12	14	17	24	32	34
10	18	21	35	38	40
25	15	17	27	40	43
18	16	18	24	29	39
14	16	20	20	27	36

1	1	1
1	2	1
1	1	1

0	0	0	0	0	0
0	17	21	29	35	0
0	17	21	28	35	0
0	18	19	25	31	0
0	0	0	0	0	0

Fig. 6.39 - *Ejemplo de filtraje digital*

Volviendo a nuestro ejemplo, el nuevo ND del píxel central se calcula por un promedio de los 8 vecinos, con una pequeña ponderación del valor central. Esos coeficientes se han aplicado a todos los píxeles centrales de la imagen. Por ejemplo, el situado en la fila 3, columna 3, con un ND inicial de 17 se convierte en la nueva imagen en:

$$ND'_{3,3} = (18+21+35+15+2x17+27+16+18+24)/10 = 20,8 » 21$$

que es un valor más cercano al sector oriental de la imagen, con valores bajos. De igual forma se procede con el resto de los píxeles hasta obtener la imagen filtrada. Al terminar el proceso, el contraste global se ha reducido: mientras la desviación típica original de los 12 píxeles afectados por el filtraje es 8,91, la correspondiente a los filtrados es 6,77, lo que indica una mayor homogeneidad en la nueva imagen. Un efecto más claro se hubiera obtenido al analizar una mayor superficie y/o aplicar un promedio simple en la matriz de CF. Un proceso similar se emplearía para cualquier otro tipo de filtraje.

6.6.5.2. *Filtros de paso bajo*

Tienen por objetivo suavizar los contrastes espaciales presentes en la imagen. En breves palabras, se trata de asemejar el ND de cada píxel al de los píxeles vecinos, reduciendo la variabilidad espacial de la escena. En términos visuales, esto supone que la imagen filtrada ofrece perfiles menos nítidos, más difuminados, como puede apreciarse en la figura 6.40, que recoge la banda 4 original y filtrada de la imagen que venimos comentando. Si comparamos ambos sectores de esta figura se observa nítidamente el efecto del filtraje. Como vemos, la imagen filtrada se muestra bastante difuminada, se han perdido la mayor parte de los contrastes espaciales, que denotan fronteras entre cubiertas. A cambio, la diferencia entre el centro urbano y la periferia parece más clara, ya que se han eliminado los contrastes internos en cada sector.

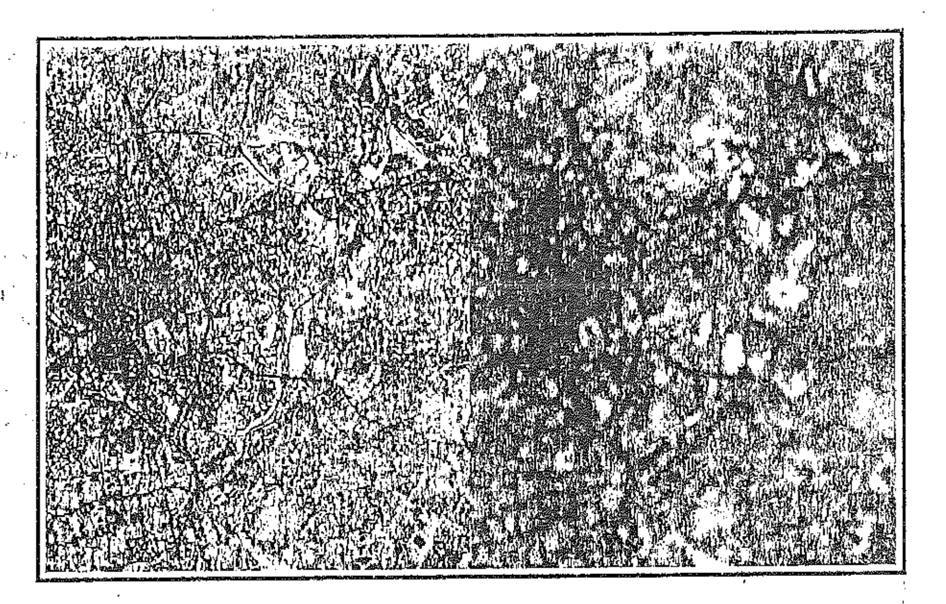


Fig. 6.40 - *Filtro de paso bajo sobre la banda 4 de la imagen de Madrid. A la izquierda la original; a la derecha, la filtrada.*

Este tipo de filtraje se utiliza para restaurar los errores aleatorios que pueden presentarse en los ND de la imagen, fruto de un defecto en la adquisición o recepción de los datos. Así mismo, se ha empleado para reducir la variabilidad espacial de algunas categorías, como paso previo a la clasificación. En este caso, se pretende atenuar el denominado «ruido de la escena», producido en las zonas altamente heterogéneas en relación con la resolución espacial del sensor. El caso más claro, y el más estudiado, es el que se produce en las zonas urbanas, en donde se mezclan distintos tipos de cubierta en un reducido espacio. Para disminuir esta variabilidad espacial, se han propuesto diversos filtros de paso bajo, que tienden a homogeneizar los ND de esas zonas. El efecto de estos filtros se ha mostrado bastante eficiente de cara a la clasificación digital (Haack et al., 1987; Cushnie y Atkinson, 1985).

El filtro de paso bajo puede obtenerse a partir de diversas matrices de filtraje. Algunas de las más habituales son:

(1)

1,00	1,00	1,00
1,00	1,00	1,00
1,00	1,00	1,00

(2)

1,00	1,00	1,00
1,00	2,00	1,00
1,00	1,00	1,00

(3)

0,25	0,50	0,25
0,50	1,00	0,50
0,25	0,50	0,25

La primera es un simple promedio de los 9 píxeles que componen la ventana de filtraje, mientras las dos segundas matrices ponderan un poco el valor central para evitar una excesiva pérdida de detalle.

En los últimos años se ha aplicado con buen rendimiento otro tipo de filtraje, basado sobre la mediana en lugar de la media. El filtro mediano se basa en sustituir el ND del píxel central por la mediana de los ND correspondientes a los píxeles vecinos. Su interés se corresponde con el propio de la mediana como medida de centralidad, ya que es menos sensible a los valores extremos y entraña una menor modificación de los datos que la media aritmética; de ahí que se haya recomendado su empleo dentro de las técnicas de análisis exploratorio de datos (Tukey, 1977). En el contexto del tratamiento digital de imágenes, se ha empleado para eliminar valores anómalos aislados, fruto de ruidos aleatorios en la adquisición de los datos. Preserva mejor los contornos que el filtro promedio, pero demanda un mayor volumen de cálculo. Se ha aplicado con éxito para reducir el moteado brillante (*speckle*) de las imágenes radar (Blom y Daily, 1982). Como podemos observar en la fig. 6.41 el filtro mediano resulta menos riguroso que el medio, reteniendo mejor los rasgos lineales de la imagen, a la vez que implica una homogeneización en la tonalidad de las diferentes cubiertas.

6.6.5.3 Filtros de paso alto

Este tipo de filtros pretende aislar los componentes de alta frecuencia en una imagen. En términos espaciales, esto supone remarcar digitalmente los contrastes espaciales entre píxeles vecinos, enfatizando los rasgos lineales presentes



Fig. 6.41 - *Filtro de paso bajo (con la mediana) sobre la banda 4 de la imagen de Madrid. A la izquierda la original; a la derecha, la filtrada.*

en la imagen, como carreteras, parcelas o accidentes geológicos. En definitiva, se intenta reforzar los contornos entre áreas homogéneas, evidenciando cualquier discontinuidad.

Varios métodos pueden conseguir este objetivo. El más sencillo pasa por restar de la imagen original la obtenida por un filtro de paso bajo. La razón es bastante obvia: si lo que se pretende es aislar los componentes de alta frecuencia (alta variabilidad), basta restar de la imagen original aquellos correspondientes a la baja frecuencia, con lo que sólo quedarían los requeridos, que se añadirían a la imagen original. En suma:

$$ND'_{i,j,k} = ND_{i,j} + (ND_{i,j} - ND_{L,i,j}) \qquad [6.40]$$

donde ND' corresponde al ND de salida, ND al original, y ND_L al resultado de un filtro de paso bajo.

Más común es, sin embargo, emplear matrices de filtraje, similares a las anteriormente analizadas. En este caso, los CF se disponen de tal modo que se refuerza el contraste entre el píxel central y los vecinos. Dos matrices frecuentemente utilizadas son:

(4)

-1	-1	-1
-1	9	-1
-1	-1	-1

(5)

0	-1	0
-1	5	-1
0	-1	0

ambas se derivan del análisis de gradientes de cambio en la imagen. El segundo filtro, denominado Laplaciano, se recomienda para el realce de rasgos lineales en la ciudad (Jensen, 1996).

Puede analizarse la aplicación de este filtro sobre la imagen de Madrid en la figura 6.42. El proceso implica un mayor realce de los abundantes rasgos lineales de la imagen: carreteras y líneas de ferrocarril, aeropuertos, viario, etc. Precisamente esta abundancia de líneas explica que la imagen resultante aparezca un tanto confusa, ya que el filtro realza los numerosos límites de la zona, perdiendo en claridad las áreas internas a esos bordes.

Las matrices de filtraje antes comentadas permiten subrayar cualquier rasgo fronterizo de la imagen, independientemente de su orientación. La misma técnica puede emplearse para construir filtros direccionales, con el propósito de reforzar aquellas líneas que sigan determinadas orientaciones. Basta disponer adecuadamente los CF, distribuyéndolos en sectores de la matriz. Algunos ejemplos de matrices de filtraje para conseguir este análisis direccional son:

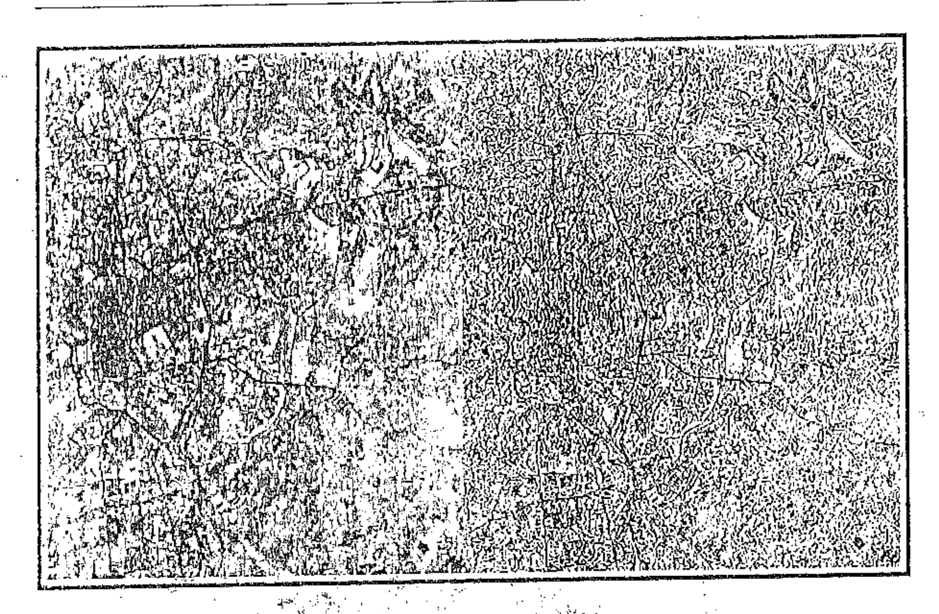


Fig. 6.42 - *Filtro de paso alto sobre la banda 4 de la imagen de Madrid. A la izquierda la original; a la derecha, la filtrada.*

(6)

NORTE		
1	1	1
1	-2	1
-1	-1	-1

(7)

SUR		
-1	-1	-1
1	-2	1
1	1	1

(8)

ESTE		
-1	1	1
-1	-2	1
-1	1	1

(9)

ORESTE		
1	1	-1
1	-2	-1
1	1	-1

(10)

SURESTE		
-1	-1	1
-1	-2	1
1	1	1

(11)

NOROESTE		
1	1	1
1	-2	-1
1	-1	-1

(12)

SUROESTE		
1	-1	-1
1	-2	-1
1	1	1

(13)

NORESTE		
1	1	1
-1	-2	1
-1	-1	1

Conviene indicar que el nombre de estas matrices es consecuencia de la dirección del contraste que señalan, y no de la dirección que están realmente realzando, que es precisamente la perpendicular. Por ejemplo, la matriz Norte estaría reforzando líneas situadas Este-Oeste (en concreto la frontera Norte de esas líneas), mientras la Este refuerza el borde oriental de las líneas Norte-Sur.

La figura 6.43 recoge la aplicación de estos filtros direccionales a un sector de la imagen de Madrid, correspondiente al centro de la ciudad. Sobre esta zona se han aplicado algunos de los filtros mencionados previamente. Concretamente, se incluyen el filtro Norte, el Oeste y el Noreste. El lector podrá comprobar

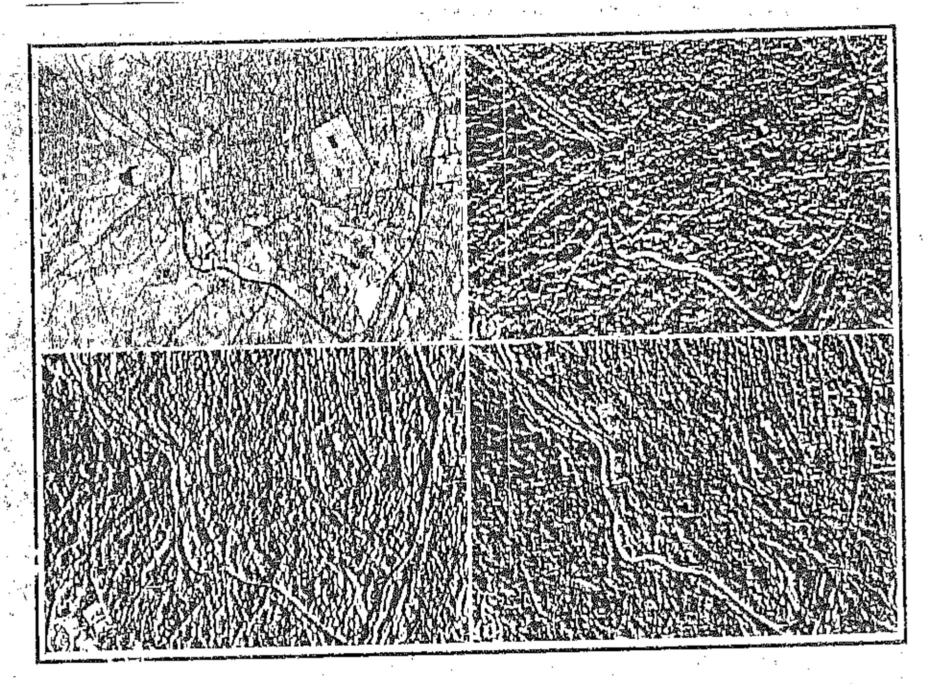


Fig. 6.43 - *Efecto de algunos filtros direccionales: (a) imagen original, (b) filtro Norte, (c) filtro Oeste y (d) filtro Noreste*

por sí mismo la influencia de las distintas matrices de filtraje sobre la imagen, reforzando las calles que siguen la principal dirección del filtraje.

Algunos autores han recomendado el empleo de filtros no lineales para reforzar fronteras o rasgos de interés en la imagen. Uno de los más empleados, en este sentido, es el denominado detector de bordes de Sobel (Gonzalez y Wintz, 1977), que realza la variación entre filas y columnas de la matriz de filtraje. En una ventana de 3 x 3 píxeles, el ND del píxel central se calcula de la forma siguiente:

$$ND'_{i,j} = \sqrt{C^2 + F^2} \qquad [6.41]$$

donde:

$$C = (ND_{i-1,j+1} + 2\,ND_{i,j+1} + ND_{i+1,j+1}) - (ND_{i-1,j-1} + 2\,ND_{i,j-1} + ND_{i+1,j-1})$$

y

$$F = (ND_{i-1,j-1} + 2\,ND_{i-1,j} + ND_{i-1,j+1}) - (ND_{i+1,j-1} + 2\,ND_{i+1,j} + ND_{i+1,j+1})$$

El efecto de este filtro sobre la imagen de Madrid puede observarse en la figura 6.44. Como se trata de una técnica para detectar rasgos de contraste espa-

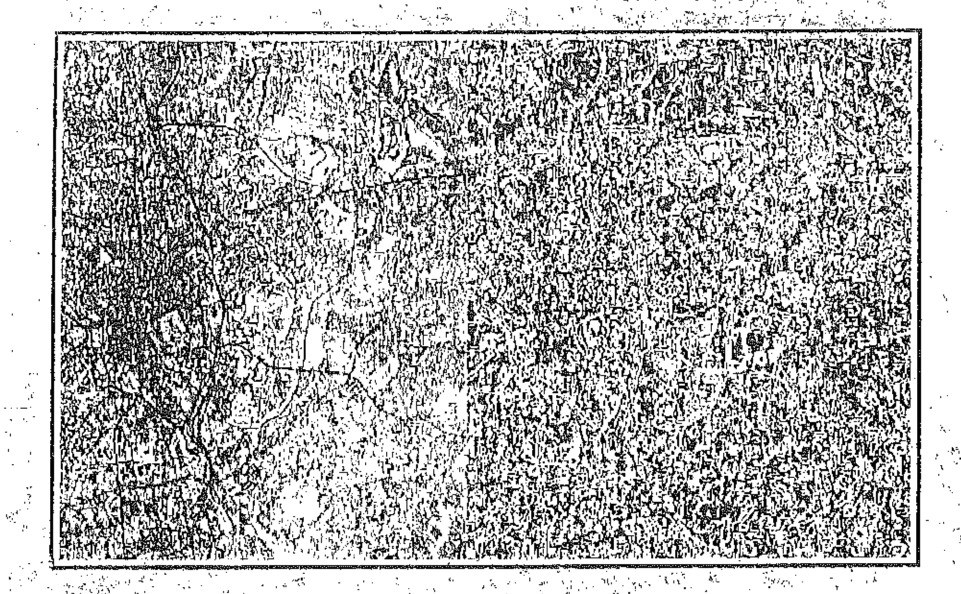


Fig. 6.44 - *Filtro no lineal de Sobel sobre la imagen de Madrid: a la izquierda la original, a la derecha la filtrada.*

cial presentes en la imagen, el producto resulta algo confuso, pues en esta escena hay múltiples cambios de cobertura, al tratarse de un área predominantemente urbana. Se remarca especialmente el trazado de las principales vías de comunicación, mientras quedan en tonos oscuros únicamente los sectores de mayor homogeneidad.

Por este efecto de subrayar las fronteras presentes en la imagen, estos filtros de paso alto se denominan en ocasiones técnicas de realce de bordes (*edge enhancement*), dirigida a subrayar los cambios espaciales presentes en la imagen. Además de los filtros arriba expuestos, una forma sencilla de realzar los bordes sería realizar una copia de la imagen, desplazarla una fila y/o columna sobre la original y restar ambas. Aquellos píxeles que ofrezcan un valor cercano a 0 indicarán áreas de escasa variación, mientras cuanto mayor sea esta diferencia, mayor será también el contraste especial entre píxeles vecinos. Asimismo puede definirse una dirección de contraste, hacia valores superiores o inferiores según sea negativa o positiva la diferencia. Se han desarrollado otros métodos de detección de bordes para aplicaciones específicas, como son la detección de lineamientos (Moore y Waltz, 1983), el realce de plumas de agua (Jensen, 1996, pp. 162-165), o la delimitación de calles en una ciudad (Gong y Howarth, 1990a).



Tratamiento Digital de Imágenes: II. Generación de Información Temática

«Profesor: que te ilusione hacer comprender a tus alumnos, en poco tiempo, lo que a ti te ha costado horas de estudio llegar a ver claro.»

[B. Josemaría Escrivá, *Surco*]

7.1. Cálculo de variables continuas

7.1.1. Modelos inductivos y deductivos en teledetección

Es obvio que el interés de la teledetección viene dado por su capacidad de proporcionarnos información temática, que cubra vacíos en nuestro conocimiento del territorio o, al menos, actualice lo que ya se había inventariado previamente.

En muchas ocasiones, se restringe el contenido informativo de la teledetección a la cartografía temática propiamente dicha. En otras palabras, las imágenes de satélite serían, bajo este punto de vista, sólo una herramienta para clasificar el territorio en categorías homogéneas, por ejemplo de cobertura del suelo, vegetación o cultivos.

Con ser de gran interés este enfoque nos parece reduccionista. Conviene no perder de vista que una imagen de satélite es un conjunto sistemático de medidas cuantitativas sobre el territorio, con un nivel de resolución espacial inalcanzable en muestreos de terreno. Si esas mediciones se relacionan con ciertos parámetros ambientales de interés, a partir de una imagen podría obtenerse la distribución espacial de dichos parámetros. Por ejemplo, en la mayor parte de los países la observación meteorológica se realiza a partir de una serie de puntos bastante dispersos en el territorio (donde se sitúan los observatorios). Si pueden relacionarse fidedignamente las medidas del sensor con la temperatura del suelo, tendríamos una representación mucho más exacta de cómo las temperaturas se distribuyen en el espacio, ya que la imagen incluye medidas sistemáticas sobre el territorio (cada kilómetro, aproximadamente, en el caso del sensor AVHRR). Esto nos permitiría enriquecer notablemente nuestro conocimiento climático de la región de interés.

Bajo esa óptica, podemos considerar la teledetección como una de las herramientas más potentes para generar información biofísica sobre el conjunto del territorio, a intervalos regulares y en condiciones comparables (sensor, altitud, hora de adquisición, etc.). Las variables que pueden deducirse, potencialmente, a partir de la teledetección son muy numerosas, siendo su rasgo común que están, de un modo u otro, relacionadas con las propiedades ópticas de los objetos, con su distancia al sensor o con su posición.

Podemos aquí establecer una primera distinción entre unas variables que son medibles de modo directo y otras que se derivan a partir de aquéllas. Las primeras se obtienen a partir de los datos adquiridos por el sensor, conociendo los parámetros de adquisición. Son las siguientes:

- Reflectividad, en las bandas del visible e infrarrojo próximo,
- Temperatura, en el infrarrojo térmico,
- Coeficiente de retro-dispersión, en la región de las micro-ondas,
- Altitud, a partir de la visión estereoscópica o de la interferometría,
- Topografía de la superficie marina, a partir del altímetro de micro-ondas.

Para obtener estas variables es preciso realizar algunos procesos de corrección en los datos brutos, con objeto de eliminar efectos anómalos (debidos a la atmósfera o las condiciones de observación). En otras palabras, no son inmediatas a la adquisición de la imagen, pero sí pueden estimarse con bastante precisión, ya que la información recibida por el sensor es consecuencia directa de esas variables (p.ej. la radiancia en el espectro visible es consecuencia de la reflectividad de la cubierta observada).

Además de éstas, la teledetección nos permite generar información de otras variables de modo indirecto; esto es, estableciendo relaciones entre tales variables y las medidas por el sensor. Contenido de clorofila en las hojas, índice de área foliar, radiación absorbida por la planta, humedad del suelo o de las hojas, materiales en suspensión en el agua, contenido de CO_2 en la atmósfera, evapotranspiración o productividad vegetal, son ejemplos de variables que se han obtenido en diversos estudios a partir de la información proporcionada por los satélites de teledetección. Para obtener estas variables, tan críticas para un conocimiento más certero de nuestro medio ambiente, es preciso relacionarlas con la información contenida en las imágenes, estableciendo un modelo suficientemente fiable.

La primera condición de cualquier modelo es asumir una relación teórica entre el parámetro a estimar y lo que mide el sensor. Por ejemplo, el índice de área foliar (*Leaf Area Index*, LAI) presenta una relación clara con la reflectividad en las bandas roja e infrarrojo cercano del espectro, ya que al aumentar la cobertura verde de una determinada zona, se producirá una reducción en la reflectividad del rojo (por incrementarse la absorción de los pigmentos en esa banda) y un aumento en el infrarrojo cercano. Ahora bien, esa relación teórica es preciso traducirla en un modelo cuantitativo, que permita convertir una imagen multibanda en una imagen del LAI para esa zona.

En ese punto, es preciso realizar una distinción entre los modelos inductivos y deductivos o, si se prefiere, entre los modelos empíricos y los teóricos (Lillesand y Kiefer, 1994; Danson et al., 1995; Strahler et al., 1986):

(i) Modelos inductivos o empíricos serían aquellos que establecen una relación numérica entre el parámetro a estimar y los ND de la imagen, a partir de unas observaciones *in situ*, tomadas en el momento de adquirir ésta. En otras palabras, se calibran los datos de la imagen con el parámetro de interés mediante funciones de ajuste local, basadas habitualmente en técnicas de regresión (Curran y Kupiec, 1995; Alonso et al., 1996; Ji et al., 1992; Ahern et al., 1991; Caselles y López, 1989), aunque también hay algunos ejemplos de ajustes mediante redes neuronales (Baret, 1995). En los dos casos, se trata de ajustes locales, sencillos de calcular y de precisión conocida. Su principal inconveniente viene dado precisamente por ese carácter local, que no permite extrapolar esas funciones a otras zonas, a otros sensores, a otras fechas en la misma zona, e incluso a otros rangos más allá de lo medido en terreno.

(ii) Modelos deductivos o teóricos. Tratan de establecer un modelo de validez general, independiente de las condiciones de observación. Parten de demostrar la relación entre el parámetro a estimar (por ejemplo, evapotranspiración) y las variables espectrales contenidas en la imagen. Una vez comprobada esa relación, con algunos ejemplos empíricos, se invierte el modelo, de tal forma que pueda estimarse esa variable a partir de las imágenes. Esto implica un proceso de ajuste que, en muchas ocasiones, resulta muy complejo y no siempre suficientemente preciso, ya que es necesario asumir condiciones que rara vez se dan en la naturaleza (p.ej., isotropía en las hojas, terreno plano, reflectividad lambertiana, etc.). Incluso aunque esta relación entre variable de interés e información espectral sea consistente, no resulta sencillo obtener esas variables espectrales, ya que es preciso eliminar de la imagen cualquier efecto extraño a la señal procedente de la cubierta. Esto implica modelar los efectos atmosféricos, la geometría de observación, el aporte del sustrato y las condiciones de mezcla con otras cubiertas, por citar sólo los más significativos. Ahora bien, pese a las dificultades que presenta, el modelado deductivo resulta un camino mucho más firme que el inductivo para estimar variables biofísicas a partir de la teledetección, ya que no requiere una información de campo, simultánea a la adquisición, que sólo estará disponible cuando se haya planificado previamente un experimento con ese objetivo.

(iii) Algunos autores plantean una alternativa intermedia, que denominan modelos semi-empíricos, en donde se asume un previo modelado de la variable a estimar, aunque el ajuste se realiza por regresiones locales. También se asigna esta denominación cuando los ajustes locales se basan sobre variables derivadas, como es el caso de los índices de vegetación (cap. 7.1.3), que ya cuenten con una relación teórica demostrada con las variables que pretenden estimarse (Danson et al., 1995).

Considerando el carácter introductorio de este manual, no parece oportuno revisar la gran cantidad de modelos que se han propuesto en la literatura especializada. Sí puede resultar ilustrativo comentar los tratamientos previos para abordar estos modelos, que resultan comunes a buena parte de ellos. Se trata de transformaciones de los ND originales que permitan disponerlos más adecuadamente para generar información biofísica. Hemos incluido, en este apartado, las técnicas para convertir los ND a valores físicos de reflectividad y temperatura, así como las transformaciones multibanda más conocidas: índices de vegetación y otros cocientes, componentes principales, *tasseled cap* y análisis lineal de mezclas espectrales.

7.1.2. Conversión de los ND a parámetros físicos

La conversión de los ND almacenados en una imagen original a variables físicas es un paso previo al establecimiento de modelos teóricos, así como a muchos estudios de tipo empírico. Ahora bien, además de servir para generar variables derivadas, el proceso de conversión tiene interés en sí mismo, pues facilita información física relevante, al proporcionar imágenes de reflectividad o temperatura del suelo. Naturalmente que esa información ya está contenida en los ND originales, pero sólo de modo relativo. En otras palabras, la relación numérica está circunscrita a cada banda de la imagen (ahí sí es cierto que a mayor ND, mayor reflectividad), pero no sirve para comparar bandas entre sí (un mayor ND entre dos bandas, no indica necesariamente mayor reflectividad), ni imágenes de distintas fechas, áreas o sensores. Por el contrario, la reflectividad o temperatura son variables físicas extrapolables a otras zonas y comparables entre sí, lo que hace más sólida la interpretación de los datos, garantiza la compatibilidad multitemporal y el análisis integrado entre imágenes de distintos sensores.

7.1.2.1. Cálculo de reflectividades

Hemos definido previamente (cap. 2) la reflectividad como la relación entre la energía reflejada y la incidente. Varía, por tanto, entre 0 (superficie perfectamente absorbente) y 1 (superficie perfectamente reflectora). Como también sabemos, la reflectividad de una cubierta depende de sus características físicas y

químicas, así como de las condiciones de observación. Además no es constante, sino que se modifica en las distintas bandas del espectro, por lo que debemos añadirle el calificativo de espectral, acotando su medida a un determinado rango de longitudes de onda. Precisamente, en el análisis de cómo varía la reflectividad espectral de una cubierta encontramos las raíces para poder discriminarla.

De acuerdo a la definición antes recordada, para conocer la reflectividad de una superficie es preciso relacionar dos magnitudes: la energía reflejada y la incidente. A partir de los datos medidos por el sensor podemos obtener la primera, ya que la radiancia espectral medida por éste es consecuencia de la reflexión de la radiación electromagnética en las cubiertas (añadiendo la influencia de la atmósfera, como luego veremos). Esa medición se codifica a un valor numérico, que hemos denominado ND, de acuerdo a unos coeficientes de calibración específicos para cada sensor. Ya que estos coeficientes son conocidos, puede realizarse el proceso inverso, obteniendo los valores de radiancia espectral detectada por el sensor a partir de los ND:

$$L_{sen,k} = a_{0,k} + a_{1,k}\, ND_k \qquad [7.1]$$

donde $L_{sen,k}$, corresponde a la radiancia espectral recibida por el sensor en la banda k (en $W\, m^{-2}\, sr^{-1}\, \mu m^{-1}$); $a_{0,k}$ y $a_{1,k}$ son los coeficientes de calibración para esa banda, y ND_k, corresponde al nivel digital de la imagen en la misma banda. Estos coeficientes de calibrado suelen incluirse en la cabecera de la cinta. En la tabla 7.1 aparecen los correspondientes al sensor TM.

Por otro lado, la radiancia que llega al sensor —asumiendo que la superficie terrestre tiene un comportamiento lambertiano— es una función de

Banda	τ_k	E_k ($W/m^2 \mu m$)	$a_{0,k}$	$a_{1,k}$
TM1	0,5	1957	-1,5	0,602
TM2	0,3	1829	-2,8	1,17
TM3	0,25	1557	-1,2	0,806
TM4	0,20	1047	-1,5	0,815
TM5	0,125	219,3	-0,37	0,108
TM7	0,075	74,52	-0,15	0,057

Tabla 7.1 - *Parámetros para la conversión a reflectividades de imágenes Landsat-TM**

(*) Los valores de transmivisividad (τ_k) se han tomado de Pons y Solé-Sugrañes (1994), mientras los de irradiancia solar y calibración de Price (1987). Estos parámetros de calibración corresponden a las imágenes TM del Landsat-4 posteriores a 1984 y a todas las del Landsat-5. Para coeficientes de calibración previos puede consultarse el artículo de Price.

la irradiancia solar, la reflectividad de la cubierta y las condiciones de adquisición (fig. 7.1):

$$L_{sen,k} = \frac{E_{0,k} \cos \theta_i \rho^*_k}{K\pi} \qquad [7.2]$$

donde $E_{0,k}$ es la irradiancia solar en el techo de la atmósfera (para esa banda del espectro), conocida a partir de las tablas solares (tabla 7.1); ρ^*_k es la reflectividad aparente de la cubierta en esa banda k; θ_i es el ángulo cenital del flujo incidente, formado por la vertical y los rayos solares (es el complementario del ángulo de elevación solar, que se incluye en la cabecera de la imagen), y K es el factor corrector de la distancia Tierra-Sol, calculado como:

$$K = (1 + 0{,}0167 (\mathrm{sen}\,(2\pi (D - 93{,}5) / 365))^2 \qquad [7.3]$$

donde D indica el día en el calendario juliano y el seno se asume en radianes.

En definitiva, la reflectividad aparente puede calcularse a partir de una sencilla fórmula:

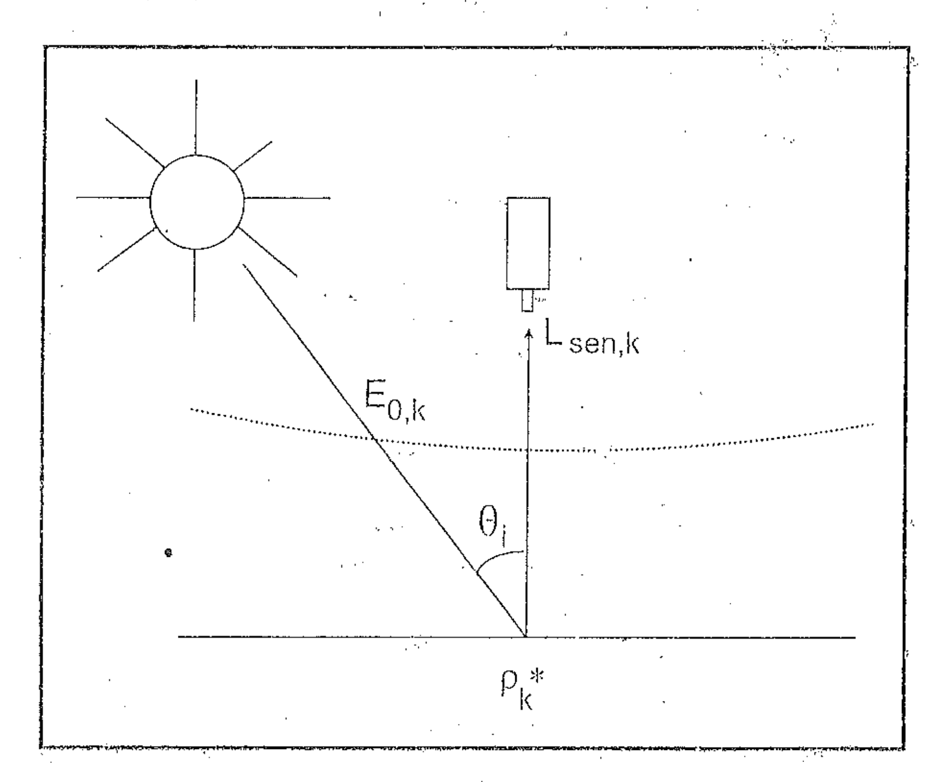


Fig. 7.1 - *Cálculo simplificado de la reflectividad*

$$\rho^*_k = \frac{K\pi L_{sen,k}}{E_{0,k} \cos \theta_i} \qquad [7.4]$$

Por tanto, el proceso de traducción de ND a reflectividades se realiza en dos fases: (i) conversión de ND a valores de radiancia ($L_{sen,k}$), a partir de los coeficientes de calibrado del sensor, y (ii) estimación de valores de reflectividad aparente (ρ^*_k), conociendo la irradiancia solar y la fecha de adquisición (de la que se estima K y el ángulo θ_i).

Lamentablemente este método no está considerando las influencias atmosféricas y asume un terreno plano y una observación vertical, lo cual puede suponer una simplificación muy grosera de la realidad. De ahí que hayamos introducido el término reflectividad aparente, pues el valor calculado sería sólo la reflectividad captada por el sensor, pero no la realmente medible en la superficie. Como ya indicamos en el cap. 2, los componentes líquidos y gaseosos de la atmósfera producen un efecto de absorción y dispersión, que modifican, a veces notablemente, la señal procedente de la cubierta. Además, este efecto es dependiente de la longitud de onda —afectando especialmente a las más cortas—, por lo que no puede prescindirse de él, ni siquiera para realizar transformaciones entre bandas. En cuanto a la observación vertical, es asumible para la mayor parte de los sensores de interés ambiental (Landsat-MSS, TM, IRS-LISS, MOS-MESSR...), pero no siempre para el SPOT-HRV (que puede variar el ángulo de observación), y el AVHRR, con un ángulo muy amplio de barrido.

La influencia atmosférica no afecta por igual a los dos componentes del cálculo de la reflectividad, flujo descendente (denominador) y ascendente (numerador), ya que el espesor de la atmósfera que atraviesan es distinto. Además, hay que considerar que a la irradiancia solar directa (la medida en las tablas) hay que añadir la difusa, procedente de otros objetos vecinos (fig. 7.2). En definitiva, la radiancia que recibe el satélite no es la misma que sale del suelo (ésta es la que interesa, pues pretendemos medir la reflectividad de la cubierta, no la influida por la atmósfera), sino que es fruto de los siguientes parámetros (Gilabert et al., 1994):

$$L_{sen,k} = L_{su,k}\, \tau_{k,o} + L_{a,k} \qquad [7.5]$$

donde $L_{su,k}$ es la radiancia que sale de la superficie; $\tau_{k,o}$, la transmisividad de la atmósfera para el flujo ascendente, y $L_{a,k}$ la radiancia aportada por la dispersión atmosférica para la banda k. La transmisividad en la dirección ascendente depende del espesor óptico de ozono ($\tau_{oz,k}$), de aerosoles ($\tau_{a,k}$) y molecular ($\tau_{r,k}$) para esa misma banda k, y del ángulo de observación (θ_o):

$$\tau_{k,o} = \exp\,(- \tau_{oz,k} - \tau_{a,k} - \tau_{r,k}) / \cos \theta_o) \qquad [7.6]$$

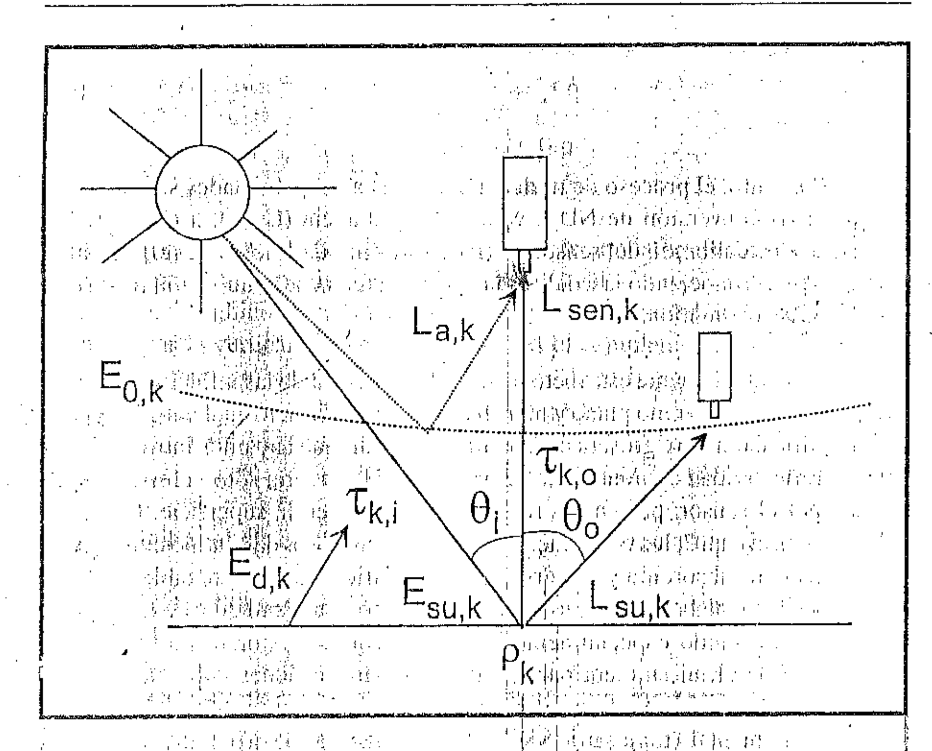


Fig. 7.2 - *Cálculo completo de la reflectividad*

El ángulo de observación sólo debe considerarse cuando la adquisición no es vertical, como ocurre en el SPOT-HRV, o para ángulos de abertura muy amplios, caso del AVHRR.

Respecto al flujo incidente, tampoco resulta fidedigno el parámetro indicado en [7.4], ya que la irradiancia que llega al suelo ($E_{su,k}$) no es la que medimos en el techo de la atmósfera ($E_{0,k}$), sino que también está afectada por la atmósfera y por el componente de luz difusa:

$$E_{su,k} = E_{0,k} \cos \theta_i \, \tau_{k,i} + E_{d,k} \qquad [7.7]$$

donde $E_{0,k}$ y $\cos \theta_i$ tienen el mismo significado de [7.4]; $\tau_{k,i}$ es la transmisividad atmosférica que afecta al rayo incidente, y $E_{d,k}$ es la irradiancia difusa, como consecuencia de la dispersión Rayleigh y Mie, que también depende de las condiciones de la atmósfera.

La transmisividad del rayo incidente tiene una expresión similar a la que afecta al flujo reflejado, cambiando el ángulo de incidencia (θ_i) por el de observación:

$$\tau_{k,i} = \exp\,(- \tau_{oz,k} - \tau_{a,k} - \tau_{r,k})/\cos \theta_i \qquad [7.8]$$

En definitiva, para conocer la reflectividad real de la cubierta, definida por:

$$\rho_k = \frac{K\pi L_{su,k}}{E_{su,k}} \qquad [7.9]$$

es preciso resolver la siguiente fórmula (a partir de [7.5] y [7.7]):

$$\rho_k = \frac{K\pi((L_{sen,k} - L_{a,k})/\tau_{k,o})}{E_{o,k} \cos\theta_i \tau_{k,i} + E_{d,k}} \qquad [7.10]$$

En definitiva, para calcular la reflectividad de la superficie necesitamos estimar la transmisividad de la atmósfera (descendente, $\tau_{k,i}$, y ascendente, $\tau_{k,o}$), la irradiancia difusa ($E_{d,k}$) y la radiancia atmosférica debida a la dispersión ($L_{a,k}$).

Los procedimientos para abordar estas correcciones con precisión son muy laboriosos y requieren datos sobre las condiciones de la atmósfera en el momento de tomar la imagen, que no suelen estar disponibles. Además, el efecto de dispersión atmosférica no es constante en la imagen, sino que determinadas zonas pueden haber sido más afectadas que otras, en función de la diversa presencia de aerosoles o vapor de agua.

Hasta el momento, suponiendo que no se dispone de datos sincrónicos a la adquisición de la imagen, las correcciones atmosféricas se han abordado siguiendo cuatro procedimientos:

(i) Asumir ciertas condiciones atmosféricas estándar, esto es una determinada composición de vapor de agua, anhídrico carbónico, oxígeno, ozono y aerosoles que implique ciertos valores estándar de transmisividad y radiancia atmosférica. En función de algunas variables elementales, como la temperatura y humedad relativa en la fecha de adquisición de la imagen, se estima qué modelo de atmósfera es más apropiado a esos datos, y se introducen en [7.10] esos valores estándar. Un sencillo ejemplo de aplicación de este criterio puede seguirse en Richards (1993, pp. 44-46). Aunque la radiancia atmosférica sea más difícil de estimar por estos modelos, sí que pueden basarse en ellos los valores de transmisividad atmosférica. En la tabla 7.1. se presentan unos valores estándar de transmisividad para nuestras latitudes (Pons y Solé-Sugrañes, 1994), que incluyen los tres componentes de la dispersión (ozono, aerosoles y molecular) antes mencionados. Estos coeficientes permiten calcular, de modo simplificado, la transmisividad global incidente como:

$$\tau_{k,i} = \exp\,(\tau_k/\cos \theta_i) \qquad [7.11]$$

siendo τ_k los valores de transmisividad para una atmósfera estándar de latitudes templadas. Este término puede introducirse en [7.10], para simplificar el cálculo de la reflectividad.

(ii) Apoyarse en los datos de la propia imagen, obteniendo a partir de los valores de las distintas bandas una estimación del efecto atmosférico. Como veremos más adelante, este criterio es bastante preciso para la corrección atmosférica en el térmico, pero en el visible resulta sólo una aproximación. Entre los métodos propuestos para la corrección a partir de los datos de la imagen destaca por su sencillez el ideado por Chavez, que se denomina corrección del histograma por sus valores mínimos (*Histogram Minimum Method*, HMM: Campbell, 1987). Se asume que las áreas cubiertas con materiales de fuerte absortividad (agua, zonas en sombra), deberían presentar una radiancia espectral muy próxima a cero. En la práctica, el histograma de los ND de la imagen siempre presenta un mínimo superior a ese valor, que se atribuye al efecto de dispersión atmosférica. Asimismo se observa que ese valor mínimo es mayor en las bandas más cortas, disminuyendo hacia el infrarrojo cercano y medio. Como ya vimos (2.8.2), la dispersión Rayleigh —la más común— afecta principalmente a las longitudes de onda más cortas, lo que confirma que ese valor mínimo puede corresponder más al efecto de la atmósfera que a la radiancia espectral proveniente de la superficie terrestre. En suma, una sencilla aproximación a la corrección atmosférica consiste en restar a todos los ND de cada banda el mínimo de esa misma banda, situando el origen del histograma en cero:

$$ND_{i,j,k}' = ND_{i,j,k} - ND_{min,k}$$

esto es, el ND del píxel (i,j) en la banda k, se ajusta restándole el ND mínimo de esa misma banda.

Posteriormente, el mismo autor sugirió un método más refinado de corrección, basado en éste pero teniendo en cuenta que la dispersión presenta una dependencia espectral; esto es, tiende a estar correlacionada entre bandas (Chavez, 1988; Chavez, 1989). Se basa en establecer una banda de referencia, la que se supone más afectada por la dispersión (TM-1 ó MSS-4, será lo más habitual). A partir del valor mínimo de esa banda, se calcula una corrección atmosférica para el resto de las bandas teniendo en cuenta dos parámetros: (i) los valores de calibración de cada banda, y (ii) una estimación de las condiciones atmosféricas en el momento de adquisición de la imagen. Chavez aporta cinco modelos atmosféricos: muy claro, claro, moderado, brumoso y muy brumoso, que son estimados por el usuario sobre información de campo o sobre un examen de la importancia del valor mínimo en cada una de las bandas. El autor aporta unas tablas para el trabajo con imágenes adquiridas por el sensor TM.

Otra variación del método de Chavez es el propuesto por Gilabert et al. (1994), que solamente requiere los ND de un objeto «oscuro» (donde pueda

asumirse que la radiancia original sería cercana a 0), en dos bandas (en su ejemplo la 1 y 3 del Landsat-TM). La dependencia espectral de dichos datos les sirve para estimar la dispersión por aerosoles. A partir de ese dato, y suponiendo la dispersión Rayleigh, estiman la transmisividad atmosférica y la irradiancia difusa (haciendo uso de datos estándar para atmósferas marítimas y continentales). Ensayan el modelo sobre varias imágenes Landsat-TM, con distintas atmósferas y tipos de cobertura. Observan notables variaciones entre la reflectividad aparente y la corregida para las bandas visibles (1, 2 y 3), del orden del 5 al 7 % en el azul, 3 al 5 % en el verde y 1 a 2 % en el rojo. La variación frente a las reflectividades aparentes es mucho menor, como cabría esperar, en las bandas infrarrojas (Gilabert et al., 1994).

(iii) El tercer método de corrección atmosférica tiene por objetivo homogeneizar los ND entre imágenes multitemporales de la misma zona. Este enfoque lo veremos con más atención en el capítulo dedicado a análisis multitemporal (7.3).

(iv) Finalmente, para el caso concreto de trabajar con índices de vegetación (NDVI, ver cap. 7.1.3) generados para imágenes NOAA-AVHRR, las correcciones atmosféricas pueden abordarse a partir de composiciones multitemporales de imágenes. Gracias a la frecuente cobertura temporal del sensor, podemos obtener imágenes diarias de la misma zona. Ahora bien, estas imágenes incluyen habitualmente muchos problemas de dispersión y absorción atmosférica (nubes), al observar una vasta zona y con un ángulo de barrido muy amplio. Se ha comprobado que la práctica totalidad de los problemas atmosféricos y de observación llevan consigo una reducción del valor del NDVI. Si asumimos que para un período de 7 a 15 días (según los autores) encontraremos alguna imagen con condiciones de adquisición idóneas (cerca del nadir, sin nubes y con una atmósfera clara), el NDVI de esa imagen tendrá, para cada píxel, el valor más alto de la serie. En consecuencia, se propone utilizar un compuesto multitemporal de imágenes, en el que cada píxel se define por el valor máximo del NDVI registrado para ese píxel en el período que se esté considerando. En otras palabras, si realizamos compuestos de 10 días, el NDVI de cada píxel será el correspondiente al valor máximo de los 10 NDVI registrados para ese período en esa posición. La técnica, conocida como Compuesto del Máximo Valor (*Maximum Value Composite*, MVC: Holben, 1986), resulta sencilla de aplicar y bastante consistente (Goward et al., 1991), aunque implica reducir la cobertura temporal de las imágenes AVHRR, de 1 a 10 días. Se han propuesto otros métodos de composición multitemporal, como el BISE (Viovy et al., 1992), pero no se aplican de modo tan rutinario.

El último elemento que conviene considerar en el cálculo de reflectividades es el efecto del relieve. La reflectividad es muy dependiente de los ángulos de incidencia y observación. Hemos asumido hasta aquí que el ángulo de incidencia es sólo dependiente de la elevación solar, lo que implica considerar un terreno

llano. En este manual no vamos a tratar con los efectos de anisotropía (cambios en la energía reflejada con el ángulo de observación), que resultarían muy complejos de modelar. Sí en cambio podemos introducir algunas ideas sobre el efecto topográfico, que cada vez resulta más fácilmente corregible gracias a la disponibilidad de modelos digitales de elevación (MDE).

Repasando la figura 7.1. podemos observar cómo la energía incidente está en función del ángulo cenital solar (θ_i). La máxima energía, para una determinada banda se obtiene cuando el ángulo cenital es de 0 grados ($\cos\theta_i = 1$), esto es cuando el sol incide verticalmente. El ángulo cenital, como ya indicamos, se calcula como el complementario del ángulo de elevación solar, que suele indicarse en la cabecera de la imagen. Ahora bien, en un terreno montañoso la pendiente modifica la geometría del flujo incidente (fig. 7.3). Por un lado, en las laderas orientadas al sol el ángulo cenital no coincide con el ángulo de incidencia, mientras en otras orientadas al norte puede ocurrir que no se reciba en absoluto energía solar directa, caso de que la vertiente esté en umbría. Si no se tiene en cuenta este efecto del relieve, la reflectividad medida para la misma cubierta en distintas vertientes puede ser muy variada, implicando severos problemas en el reconocimiento y clasificación de coberturas temáticas. Algunas combinaciones entre bandas pueden paliar este efecto topográfico. Por ejemplo al dividir bandas que han sido

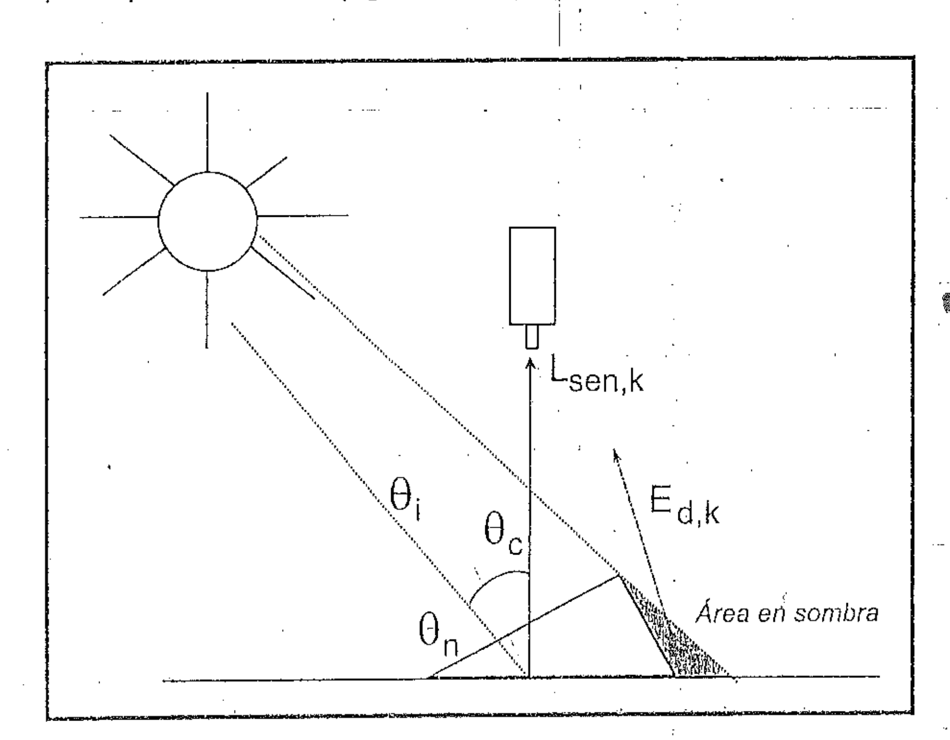


Fig. 7.3 - *Efecto del relieve sobre la radiancia detectada por el sensor*

afectadas de igual modo por el relieve, se eliminan mutuamente los ángulos de observación. Sin embargo, esta simple corrección no considera el aporte de luz difusa, que es distinto en cada banda.

Caso de que pueda disponerse de un MDE suficientemente preciso y bien ajustado a la imagen, se puede estimar la variación introducida en los ND por el efecto topográfico a partir de modelar las condiciones de iluminación (Civco, 1989; Colby, 1991; Conese et al., 1993):

$$Il = \cos\theta_c \cos\theta_n + \operatorname{sen}\theta_c \operatorname{sen}\theta_n \cos(\phi_c - \phi_n) \qquad [7.12]$$

donde Il corresponde al coseno del ángulo de insolación (θ_i), que nos sirve para valorar el efecto de iluminación en la vertiente, θ_c indica el ángulo cenital solar, θ_n la pendiente del terreno, ϕ_c el ángulo acimutal solar y ϕ_n el ángulo de orientación de la vertiente. Estos cuatro ángulos pueden obtenerse del MDE y de la fecha y hora de adquisición de la imagen. El parámetro Il resultante varía entre -1 y +1, indicando para cada píxel del MDE las condiciones de mínima y máxima iluminación, respectivamente. Esa imagen de iluminación puede introducirse en una clasificación multibanda o emplearse para corregir los ND de cada banda original. Con este enfoque, Civco (1989) propone la siguiente fórmula:

$$ND'_{i,j} = ND_{i,j} + (ND_{i,j} * (Il_x - Il_{i,j})/Il_x) \qquad [7.13]$$

donde $ND'_{i,j}$ y $ND_{i,j}$ indican los ND de salida y entrada, respectivamente, para los píxeles **i,j**; Il_x la media de la imagen de iluminación para toda la imagen, y $Il_{i,j}$ el valor de iluminación para el píxel **i,j**.

Conese et al. (1993) proponen una corrección más rigurosa, que tiene en cuenta, además del ángulo de insolación (β= arcos Il), la irradiancia difusa. Para un terreno montañoso, se puede ajustar la radiancia incidente, que vimos en [7.7], de acuerdo a:

$$E^*_{su,k} = E_{0,k} \cos\beta\, \tau_{k,i} + E^*_{d,k} \qquad [7.14]$$

donde $E^*_{su,k}$ y $E^*_{d,k}$ indican la radiancia que llega al suelo y la difusa, respectivamente, en un terreno montañoso. Si el ángulo de incidencia (β) supera los 90° (o, si se prefiere, el $\cos\beta < 0$), la vertiente está en sombra. No hay, por tanto, iluminación directa, y la que llega al suelo es únicamente la difusa ($E^*_{d,k}$), que se calcula a partir de las condiciones atmosféricas en función del ángulo de incidencia, de la pendiente del terreno y de un coeficiente de anisotropía ($E_{su,k}/E_{0,k}$), dependiente de la banda y la fecha de observación. Para el ámbito de trabajo presentado por Conese y colaboradores, esta corrección topográfica mejora bastante el cálculo de reflectividades en zonas de topografía quebrada, reduciendo notablemente la variabilidad espectral de los tipos de cubierta. No obstante, los autores advierten que el

algoritmo resulta poco adecuado para imágenes de invierno o topografía muy abrupta, con ángulos de incidencia muy bajos (Conese et al., 1993).

A modo de ejemplo, hemos calculado los valores de reflectividad para las bandas correspondientes a una imagen Landsat-TM del valle del Jarama y Manzanares, próximo al municipio de Arganda del Rey (al Sureste de la ciudad de Madrid). La imagen se adquirió el 23 de julio de 1992 y nos servirá de ejemplo para la mayor parte de los tratamientos presentados en este capítulo. Las imágenes de reflectividad se han calculado a partir de los ND de las bandas originales, considerando la altura del sol sobre el horizonte (54°), que implica un ángulo cenital de 36°, y la fecha de adquisición de la imagen (el factor K deducido de [7.3] equivale a 1,03). El cálculo de reflectividades se basa en una opción incluida en el paquete de programas XPACE (PCI, 1994), que ofrece varios archivos auxiliares para la corrección atmosférica, deducidos a partir de programas de simulación para distintos escenarios (Richter, 1990). En nuestro caso, hemos seleccionado una atmósfera estándar para latitudes medias y zonas rurales, en verano. La visibilidad estimada fue de 10 km, sobre una elevación media de 500 m. Los coeficientes de calibración del sensor se han tomado de Price (1987).

La figura 7.4 muestra las curvas calculadas a partir de valores medios de reflectividad de distintas categorías temáticas. Se observa una clara coincidencia de estos valores con las curvas de laboratorio, que tuvimos ocasión de analizar en el capítulo 2, si bien resultan algo elevados los valores correspondientes al agua, tal vez por una infravaloración del efecto atmosférico, si bien en esta zona se trata de aguas someras. Conviene anotar el trazado casi paralelo entre las curvas de cubiertas herbáceas (pastizales) y de áreas residenciales ajardinadas, aunque éstas presentan una reflectividad promedio más alta. Este paralelismo es consecuencia

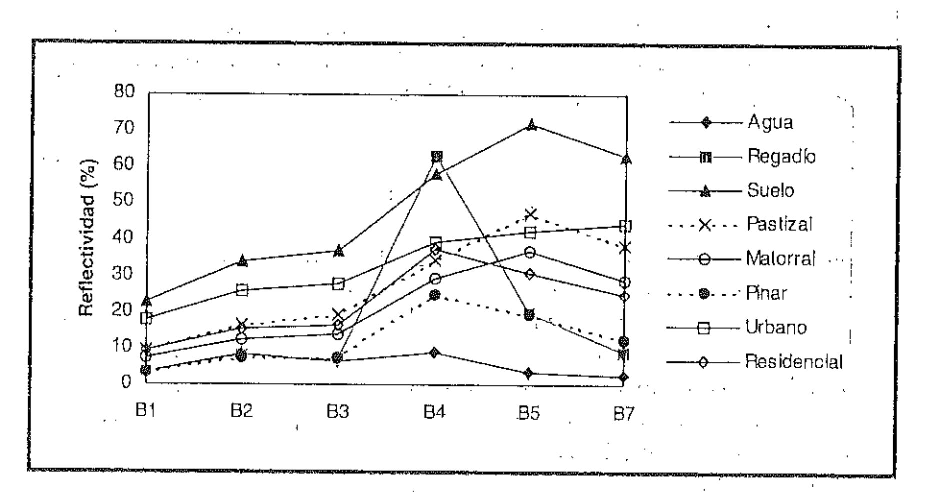


Fig. 7.4 - *Curvas de reflectividad para algunas cubiertas características*

de una señal mixta en estas superficies residenciales, provocada por la combinación de cubiertas de muy distinta reflectividad (áreas construidas, vegetación, espacios deportivos, etc.).

7.1.2.2. Cálculo de temperaturas

El cálculo de la temperatura de superficie es un proceso rutinario en aplicaciones oceanográficas, en donde este parámetro es clave para estudiar aspectos climáticos, así como en aplicaciones pesqueras. En lo que se refiere a temperaturas terrestres la investigación ha sido muy intensa en los últimos años ya que, pese a la dificultad de la estimación, se considera un elemento clave en los estudios de cambio climático global.

De modo esquemático, el proceso para el cálculo de temperatura se inicia con los ND detectados por el sensor. Al igual que en el espectro óptico, esos valores codifican un valor de radiancia (fig. 7.5), en este caso correspondiente al infrarrojo térmico. Aquí el objetivo no es encontrar la relación entre el flujo incidente en el suelo y el reflejado al sensor, sino entre el flujo emitido por el suelo y el

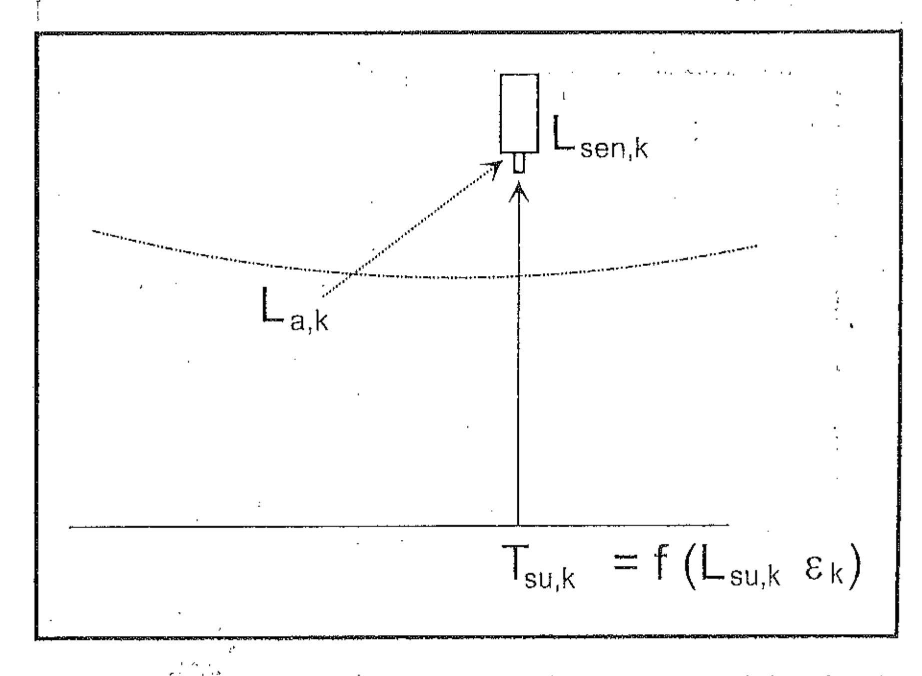


Fig. 7.5 - *La temperatura de superficie puede obtenerse a partir de la radiancia detectada por el sensor, siempre que se conozca la radiancia atmosférica y la emisividad*

recibido por el sensor. Entre ambas magnitudes vuelven a interponerse los componentes de la atmósfera, que también emiten su propia energía, distorsionando la radiancia recibida por el sensor.

Supuesto que eliminúramos las influencias atmosféricas, bastaría conocer el flujo emitido en el suelo para saber su temperatura, ya que, como vimos, la radiación que emite un objeto es una función de su temperatura, de acuerdo a la ley de Planck [2.4]. Ahora bien, esta ley está definida para un emisor perfecto, denominado cuerpo negro. En consecuencia, el segundo problema en el cálculo de la temperatura radiativa, y además el más espinoso, es estimar la relación entre la emitancia de una superficie determinada y la que se produce en un cuerpo negro a la misma temperatura; en definitiva, es preciso conocer la emisividad de la cubierta para calcular su temperatura.

Tras este comentario, podemos ofrecer un esquema más cuantitativo para abordar ese cálculo. Seguimos el método propuesto por Coll et al. (1994), refinado por Caselles et al. (1995) para obtener temperaturas de superficie (TS) a partir de imágenes AVHRR. Aunque también puede calcularse la TS desde imágenes Landsat-TM (que cuenta con un canal térmico), el sensor AVHRR ha sido el más utilizado para este tipo de estudios, ya que son más convenientes sus horas de adquisición. El método propuesto en este epígrafe está ajustado a latitudes medias, en donde los autores han encontrado errores por debajo de 1,1 K para la determinación de la temperatura superficial del suelo y de 0,7 K para la superficie del mar (Caselles et al., 1995).

Al igual que en el caso de las reflectividades, el primer paso en el cálculo de la temperatura es convertir los ND en radiancias. Puede usarse la misma fórmula antes vista [7.1], si bien en este caso los coeficientes se cambian de línea a línea, aunque de modo poco significativo, de acuerdo al sistema de calibración que utiliza el AVHRR para sus dos canales térmicos.

Una vez calculada la radiancia, puede estimarse la temperatura de brillo a partir de la inversión de la ecuación de Planck (Kidwell, 1991):

$$T^{*}(L) = \frac{c_2 v}{\ln\left(1 + c_1 v^3 / L_{sen,v}\right)} \qquad [7.15]$$

donde T^* indica la temperatura de brillo en Kelvin para un determinado valor de radiancia L, v corresponde a la longitud de onda central de la banda térmica que estemos considerando (cm^{-1}), y c_1 y c_2 son constantes ($c_1 = 1{,}1910659 \times 10^{-5}$ mW m^{-2} sr^{-1} cm^{-4} y $c_2 = 1{,}438833$ cm K).

La corrección atmosférica se realiza a partir de una variante del algoritmo denominado de ventana partida (*split window*), que estima el efecto atmosférico

en cada píxel por la diferència de sus radiancias en las dos bandas térmicas del AVHRR. Existen múltiples variantes de este algoritmo, inicialmente desarrollado para el cálculo de la temperatura del océano. Para las condiciones promedio de nuestras latitudes, podemos utilizar la siguiente formulación (Coll et al., 1994; Caselles et al., 1995):

$$T^*_s = T^*_4 + [1{,}0 - 0{,}58\,(T^*_4 - T^*_5)]\,(T^*_4 - T^*_5) \qquad [7.16]$$

donde T^*_s indica la temperatura de brillo en la superficie; T^*_4 y T^*_5 son respectivamente las temperaturas de brillo de los canales 4 y 5 del AVHRR.

Finalmente, el cálculo de la temperatura de superficie corregida de emisividad se realiza mediante:

$$T_s = T^*_s + 0{,}51 + 40\,(1 - \bar{\varepsilon}) - 75\,\Delta\varepsilon \qquad [7.17]$$

donde $\bar{\varepsilon}$ corresponde a la emisividad promedio de ese píxel en los canales 4 y 5, y $\Delta\varepsilon$ a la diferencia de emisividad de ese píxel en los mismos canales ($\Delta\varepsilon = \varepsilon_4 - \varepsilon_5$).

El elemento más complejo de obtener en la fórmula propuesta es el correspondiente a las emisividades de los canales 4 y 5, ya que dependen del tipo de cubierta presente en el suelo. Al tratarse de un píxel de 1 km², puede existir de hecho una notable heterogeneidad, que tiende a solventarse eligiendo valores promedio. El contraste de la emisividad más importante es el que se produce entre el suelo desnudo y el cubierto de vegetación. Por tanto, una forma de estimar esas emisividades medias es conocer qué porcentaje de esa parcela de 1 km² está cubierta por vegetación. Para ello, puede utilizarse un mapa de la cobertura del suelo, obtenido por otras fuentes, o generar a partir de la misma imagen NOAA una estimación de la cubierta verde, basándose en los valores de los índices de vegetación (ver cap. 7.1.3) que presenten áreas completamente descubiertas y completamente cubiertas de vegetación. Ésta es la base del método propuesto por Valor y Caselles (1996), que estima, para cada imagen y cada píxel, ese porcentaje de cubierta verde por relación a los mínimos y máximos de verdor detectados en una serie suficientemente larga de imágenes:

$$P_v = \frac{\left(1 - \left(NDVI / NDVI_{min}\right)\right)}{\left(1 - \left(NDVI / NDVI_{min}\right)\right) - k\left(1 - \left(NDVI / NDVI_{max}\right)\right)} * 100 \qquad [7.18]$$

donde $NDVI_{max}$ y $NDVI_{min}$ corresponden a los valores del índice de vegetación observados como máxima y mínima cubierta vegetal, respectivamente, y k es un factor de normalización:

$$k = (\rho_{2v} - \rho_{1v}) / (\rho_{2s} - \rho_{1s}) \qquad [7.19]$$

siendo ρ_{2v} y ρ_{1v} las reflectividades de la vegetación en los canales 2 y 1 del AVHRR, respectivamente, mientras ρ_{2s} y ρ_{1s} indican las reflectividades del suelo en esos mismos canales.

A partir del porcentaje de cobertura verde, puede calcularse la emisividad de cada píxel multiplicando la proporción de superficie ocupada por vegetación por la emisividad media de la vegetación (ε_v = 0,952 para herbáceos secos, 0,983 para árboles y 0,985 para herbáceos verdes y arbustos; también puede aplicarse un valor promedio global de 0,985), y el resto por la emisividad media del suelo descubierto (ε_s=0,968 para suelos arenosos; 0,972 para limosos y 0,974 para arcillosos. Aquí el valor promedio sería 0,96). Para un píxel mixto, Valor y Caselles (1996) proponen la siguiente fórmula:

$$\varepsilon = \varepsilon_v P_v + (1 - P_v)\varepsilon_s + 4d\varepsilon \cdot P_v \cdot (1 - P_v) \qquad [7.20]$$

mientras $\Delta\varepsilon$ se calcularía como:

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_v P_v + (1 - P_v)\Delta\varepsilon_s + d\Delta\varepsilon \qquad [7.21]$$

los términos $d\varepsilon$ y $d\Delta\varepsilon$ evalúan, respectivamente, los efectos de cavidad de ε y $\Delta\varepsilon$, y pueden determinarse a partir de las características geométricas de las plantas, aunque tienen una contribución muy pequeña. Valor y Caselles (1996) recomiendan emplear un valor promedio de 0,015 para $d\varepsilon$, si no se dispone de información más detallada.

En la figura 7.6 aparecen dos imágenes de la temperatura de superficie de Andalucía correspondientes a la última semana de abril y de julio (Alonso et al., 1995). En este caso, se señalaron como umbrales de suelo descubierto y superficie completamente verde, los valores de NDVI de 0,1 y 0,8, respectivamente, situados en Almería y la zona de regadío del valle del Guadalquivir. El análisis comparativo entre ambas imágenes revela el interés de realizar un seguimiento temporal de esta variable, ya que nos permite conocer la dinámica de las cubiertas terrestres y algunos rasgos de las variedades climáticas locales. Se observan tonos más claros (mayor temperatura) en la imagen de julio, para la mayor parte de la superficie, salvo los cultivos de regadío del valle del Guadalquivir. La Sierras de Cazorla y Nevada mostraron elevada nubosidad en la imagen de Abril, de ahí que se observe mayor ruido en estos sectores.

Esta observación térmica tiene gran interés para el seguimiento de fenómenos que afectan a la vegetación. La temperatura de superficie está inversamente relacionada con el vigor vegetal, ya que la evapotranspiración libera calor y, en consecuencia, reduce la temperatura de la masa vegetal frente al suelo descubierto. Por tanto, la evolución temporal de la temperatura de superficie nos permite estimar las condiciones de vigor o estrés de la planta, de cara a estudios de rendimiento agrícola (Caselles y Sobrino, 1989) o de riesgo de incendios (Vidal et al., 1994; Prosper-Laget et al., 1994).

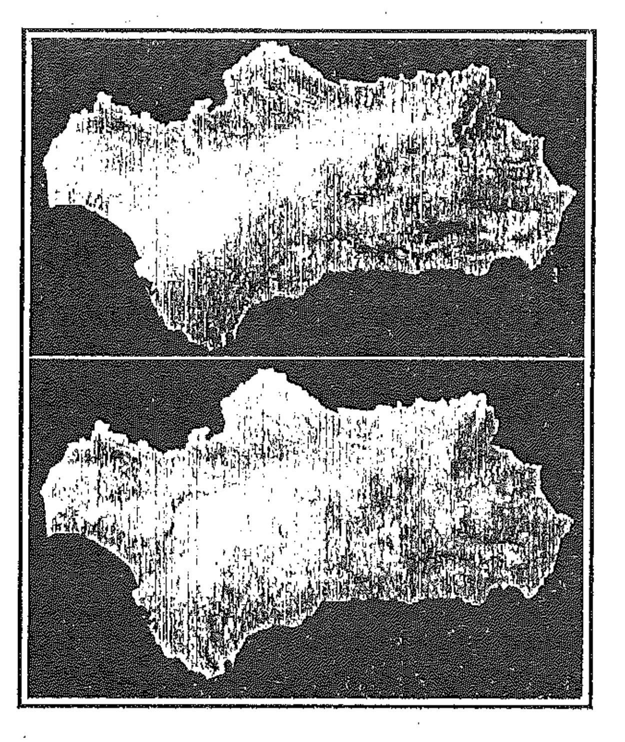


Fig. 7.6 - *Imágenes de la temperatura de superficie de Andalucía para la última semana de abril (superior) y julio (inferior)*

7.1.3. Cocientes e índices de vegetación

Como su nombre indica, un cociente o ratio implica efectuar una división, píxel a píxel, entre los ND almacenados en dos o más bandas de la misma imagen.

Se utilizan ampliamente en dos situaciones: (i) para mejorar la discriminación entre dos cubiertas con comportamiento reflectivo muy distinto en esas dos bandas, por ejemplo para realzar suelos y vegetación en el visible e infrarrojo cercano, y (ii) para reducir el efecto del relieve (pendiente y orientación) en la caracterización espectral de distintas cubiertas.

El empleo de los cocientes para discriminar masas vegetales se deriva del peculiar comportamiento radiométrico de la vegetación. Como ya vimos en el capítulo 2, la signatura espectral característica de la vegetación sana muestra un claro contraste entre las bandas visibles —y especialmente la banda roja (0,6 a 0,7 μm)— y el infrarrojo cercano (0,7 a 1,1 mm). Mientras en la región visible, los pigmentos de la hoja absorben la mayor parte de la energía que reciben, estas sustancias apenas afectan al infrarrojo cercano. Por esta razón, se produce un notable contraste espectral entre la baja reflectividad de la banda roja del espectro y la del infrarrojo cercano, lo que permite separar, con relativa claridad, la vegetación sana de otras cubiertas (fig. 7.7). Cuando la vegetación sufre algún

tipo de estrés (por ejemplo, por plagas o sequías), su reflectividad será inferior en el infrarrojo cercano, aumentando en el rojo, con lo que el contraste entre ambas bandas será mucho menor. En definitiva, podemos señalar que cuanto mayor sea el contraste entre las reflectividades de la banda infrarroja y roja, mayor vigor vegetal presentará la cubierta observada. Bajos valores de contraste indican una vegetación enferma o senescente, hasta llegar a las cubiertas sin vegetación, que ofrecen un contraste muy pequeño.

En este principio se apoyan la mayor parte de los denominados índices de vegetación, en los que se combinan la banda roja (R) e infrarrojo cercano (IR) del espectro. Los más empleados son el simple cociente entre esas bandas, y el denominado índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, *Normalized Difference Vegetation Index*):

$$Coc_i = \frac{\rho_{i,IRC}}{\rho_{i,R}} \qquad [7.22]$$

y

$$NDVI_i = \frac{\rho_{i,IRC} - \rho_{i,R}}{\rho_{i,IRC} + \rho_{i,R}} \qquad [7.23]$$

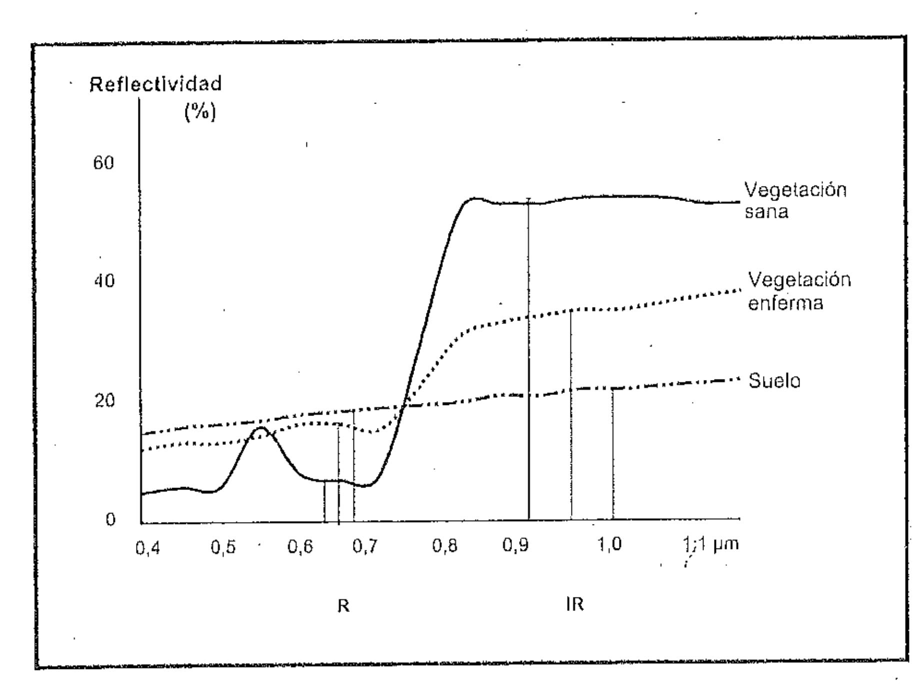


Fig. 7.7 - *Los índices de vegetación se apoyan en el contraste espectral que presenta esta cubierta entre las bandas del rojo e infrarrojo cercano*

donde $\rho_{i,IRC}$ y $\rho_{i,R}$ indican las reflectividades del píxel i en la banda del infrarrojo cercano y del rojo, respectivamente. Esos índices se obtienen a partir de las bandas 7 y 5, para el caso del sensor MSS; las bandas 4 y 3 para el TM; la 3 y 2, para el HRV, y la 2 y 1 para el AVHRR.

Para calcular estos índices con rigor deberían aplicarse previamente las correcciones atmosféricas y la conversión de ND a reflectividades, antes comentadas. Algunos autores, no obstante, no tienen inconveniente en emplear directamente los ND de la imagen, siempre que no se pretenda conceder un valor físico a los resultados. En ese caso, el cociente o índice de vegetación presentará una valoración relativa, aunque sigue manteniéndose el principio anterior: cuanto mayor sea el resultado, mayor vigor vegetal presenta la zona observada.

Aplicando un modelo teórico, Guyot y Gu (1994) concluyen que los valores del NDVI para imágenes Landsat y SPOT calculados a partir de ND subestiman entre 0,05 y 0,20 el valor calculado con reflectividades, siendo este error mayor con valores de NDVI inferiores a 0,5 y para las imágenes SPOT. En consecuencia, proponen una corrección que haga equivalente el cálculo con ND o reflectividades (Guyot y Gu, 1994):

$$NDVI_{TM,p} = \frac{ND_{IRC} - 0{,}801\ ND_R}{ND_{IRC} + 0{,}801\ ND_R} \qquad [7.24]$$

para imágenes Landsat-TM, y

$$NDVI_{HRV,p} = \frac{ND_{IRC} - 0{,}633\ ND_R}{ND_{IRC} + 0{,}663\ ND_R} \qquad [7.25]$$

para imágenes SPOT-HRV.

Un aspecto de gran interés del NDVI, frente al cociente simple, es que varía entre unos márgenes conocidos, de -1 a + 1, lo que facilita notablemente su interpretación. Por ejemplo, podemos señalar como umbral crítico para cubiertas vegetales un valor de NDVI en torno a 0,1 y para la vegetación densa de 0,5 (Holben, 1986).

Tanto el NDVI como el cociente simple se han empleado profusamente para estimar diversos parámetros de la cubierta vegetal, lo que les constituye en un papel protagonista de cara a la evaluación ambiental, especialmente con un enfoque global. Entre los parámetros que se han relacionado satisfactoriamente con los índices de vegetación están los siguientes:

(i) Indice de área foliar, LAI, que presenta una asociación positiva con el NDVI, especialmente cuando la vegetación no cubre totalmente el suelo, ya

que a ciertos valores de LAI (por encima de 4, habitualmente), el NDVI se satura (Baret, 1995). En consecuencia, más bien hemos de considerar que se trata de una relación asintótica (Sellers, 1987). Relacionado con este índice, se ha comprobado una alta correlación entre NDVI y porcentaje de cubierta verde (Kennedy, 1989; Kerr et al., 1992).

(ii) Contenido de agua en la hoja, a través de correlaciones negativas y lineales, según algunos autores (Westman y Price, 1988), aunque para otros en realidad esta estimación sólo se hace de modo indirecto, a través de la correlación entre el estrés hídrico y el LAI (Hunt y Rock, 1989).

(iii) Flujo neto de CO_2, tanto a nivel local (Hall et al., 1991b), como global (Tucker et al., 1986).

(iv) Radiación fotosintéticamente activa absorbida por la planta, APAR, con una relación directa y casi lineal (Asrar et al., 1989), especialmente cuando las hojas son horizontales y el suelo es suficientemente oscuro (Sellers, 1989).

(v) Productividad neta de la vegetación, relacionada con la APAR a través de un factor de eficiencia para cada planta (Sellers, 1989; Steven y Jaggard, 1995). De modo indirecto, puede estimarse la biomasa verde y seca, aunque aquí los grados de ajuste varían mucho con los estudios, desde los muy buenos (Holben, 1980; Kennedy, 1989) hasta los bastante discretos (Tucker, 1979).

(vi) Contenido de clorofila en la hoja, directa y linealmente relacionado (Sellers, 1985; Curran et al., 1990).

(vii) Cantidad de lluvia recibida por el dosel vegetal, lo que está directamente relacionada con su vigor vegetal, aunque habitualmente se presente un cierto desfase entre la precipitación y la respuesta de la cubierta vegetal (Taylor et al., 1985; Millington et al., 1994)

(viii) Dinámica fenológica, a partir de seguir la evolución estacional de los parámetros antes señalados (Sampson, 1993).

(iv) Evapotranspiración potencial, inversamente relacionado con los índices de vegetación a través del vigor de la hoja y el estrés hídrico (Cihlar et al., 1991; Martín et al., 1995).

Los índices de vegetación, y especialmente el NDVI calculado sobre el sensor AVHRR, se están empleando de modo rutinario para el seguimiento de las condiciones de la cubierta vegetal en la superficie terrestre, como una variable clave en los estudios de cambio global (Walker y Turner, 1990; IGBP, 1992; Chuvieco, 1992a). La disponibilidad de largas series de datos, la cobertura global de la Tierra y su fácil adquisición, explican el papel protagonista de este sensor para tales estudios (Eidenshink y Haas, 1992; Foody y Curran, 1994), ya que permite estimar el estado de vigor vegetal sobre grandes espacios, detectando fenómenos de amplio rango de acción. Además, este seguimiento puede realizarse casi en tiempo real, lo que permite abordar el control de episodios muy efímeros, así como la previsión de desastres. Fenómenos como el avance de la desertización (Justice et al., 1985), la deforestación tropical (Malingreau y Tucker, 1987; Malingreau, 1991; Batista y Tucker, 1991), los incendios forestales (Chuvieco y Martín, 1994a), o la caracterización de biomas a escala continental (Goward et al., 1987), pueden ser eficazmente estudiados gracias a este tipo de índices. En nuestro país, el NDVI se ha empleado muy eficazmente para la previsión de sequías y riesgo de incendios forestales, a partir del análisis de series multitemporales (López et al., 1991; Illera et al., 1995; Alonso et al., 1995). Imágenes promedio del NDVI, adquiridas a lo largo de varios años, han permitido también obtener una clasificación global de la cobertura del suelo (Townshend et al., 1987; Townshend et al., 1991), apoyando la discriminación de algunas categorías con información auxiliar, como topografía, regiones biogeográficas o edafológicas (Brown et al., 1993; Millington et al., 1994).

Varios autores han puesto de relieve el efecto de factores externos en el valor del NDVI. Especialmente en el trabajo en zonas semiáridas, donde la contribución del suelo es muy importante, se ha comprobado que el NDVI no resulta una medida muy consistente de las condiciones de la vegetación. En consecuencia, se propone corregir la fórmula anterior incorporando un parámetro (L) relacionado con la reflectividad del suelo (Huete, 1987). De esta forma, se calcula el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI):

$$SAVI_{i,j} = \frac{\rho_{i,j,IRC} - \rho_{i,j,R}}{\rho_{i,j,IRC} + \rho_{i,j,R} + L}(1 + L) \qquad [7.26]$$

donde L, indica una constante para ajustar la línea vegetación-suelo al origen (los autores indican un posible valor en torno a 0,5: Huete et al., 1994). En estudios experimentales sobre campos de hierba y algodón, se comprobó que este índice reducía sustancialmente las variaciones inducidas por el suelo en comparación con el NDVI y otros índices, en la mayoría de las condiciones de la vegetación (Huete, 1987).

Otro factor de importancia en el cálculo del NDVI es el efecto atmosférico, que tiende en principio a reducir su valor. Como ya vimos, para imágenes AVHRR la corrección suele abordarse eligiendo, para cada píxel, el valor de NDVI máximo de una serie diaria (los compuestos del máximo valor, que habitualmente se forman a partir de imágenes de entre 7 y 15 días). Esto garantiza que el NDVI seleccionado sea el más puro, tanto en condiciones atmosféricas, como en ángulo

de observación (Holben, 1986). Sin embargo, en imágenes SPOT o TM este enfoque no resulta muy razonable, dado el coste de las mismas y la frecuencia de adquisición. Una alternativa es ajustar el NDVI a las condiciones atmosféricas, teniendo en cuenta la diferente dispersión de los canales azul y rojo del espectro. De esta forma se define el denominado índice de vegetación atmosféricamente resistente (ARVI: Kaufman y Tanré, 1992):

$$ARVI_{i,j} = \frac{\rho^*_{IRC} - \rho^*_{RA}}{\rho^*_{IRC} + \rho^*_{RA}} \qquad [7.27]$$

donde ρ^*_{IRC} indica la reflectividad aparente en el infrarrojo cercano y ρ^*_{RA} un factor que considera la diferencia de reflectividad entre el azul y el rojo, y se define como:

$$\rho^*_{RA} = \rho^*_R - \gamma(\rho^*_A - \rho^*_R) \qquad [7.28]$$

donde ρ^*_A y ρ^*_R indican las reflectividades aparentes en el azul y rojo, respectivamente, y γ es un parámetro de calibración, que depende del tipo de atmósfera, aunque para la mayor parte de los casos es igual a 1.

La figura 7.8 presenta el NDVI calculado para la imagen de Arganda. Se observan con nitidez las cubiertas de vegetación más vigorosa, como los cultivos de regadío y árboles de ribera próximos al cauce del Jarama. Las láminas de agua ofrecen los valores de NDVI más bajos, así como las zonas urbanas de densa edificación (véase el casco urbano de Arganda, en el vértice SE de la imagen). Por su parte las áreas de urbanización ajardinada presentan unos valores de NDVI más altos. En nuestro caso, las urbanizaciones de Rivas, situadas junto a la N-III en el sector NW de la imagen, muestran un patrón característico con tonos claros sobre un entramado regular más oscuro (viales).

Además de los arriba indicados, se han realizado múltiples propuestas de índices de vegetación alternativos, basados en las mismas bandas (infrarrojo cercano y rojo). Sin embargo, varios autores han demostrado que estos índices son, en buena parte, equivalentes a los anteriores (Tucker, 1979; Perry y Lautenschlager, 1984; Yates, 1984), por lo que no parece oportuno detenernos en su comentario.

Los que sí parecen aportar un notable grado de innovación sobre los índices de vegetación analizados son los basados en el infrarrojo medio y el cercano. Varios autores han demostrado que la variación en el contenido de agua en las hojas, y por tanto el estrés hídrico, se observa más nítidamente en el infrarrojo medio que en el cercano y visible (Tucker, 1980; Rock et al., 1986; Cohen, 1991a). Puesto que el agua es el principal protagonista de la baja reflectividad en esa banda (hasta el 50 % de la absorción en el infrarrojo medio puede deberse al contenido de agua en la hoja: Lusch, 1989), al disminuir la humedad de la planta,

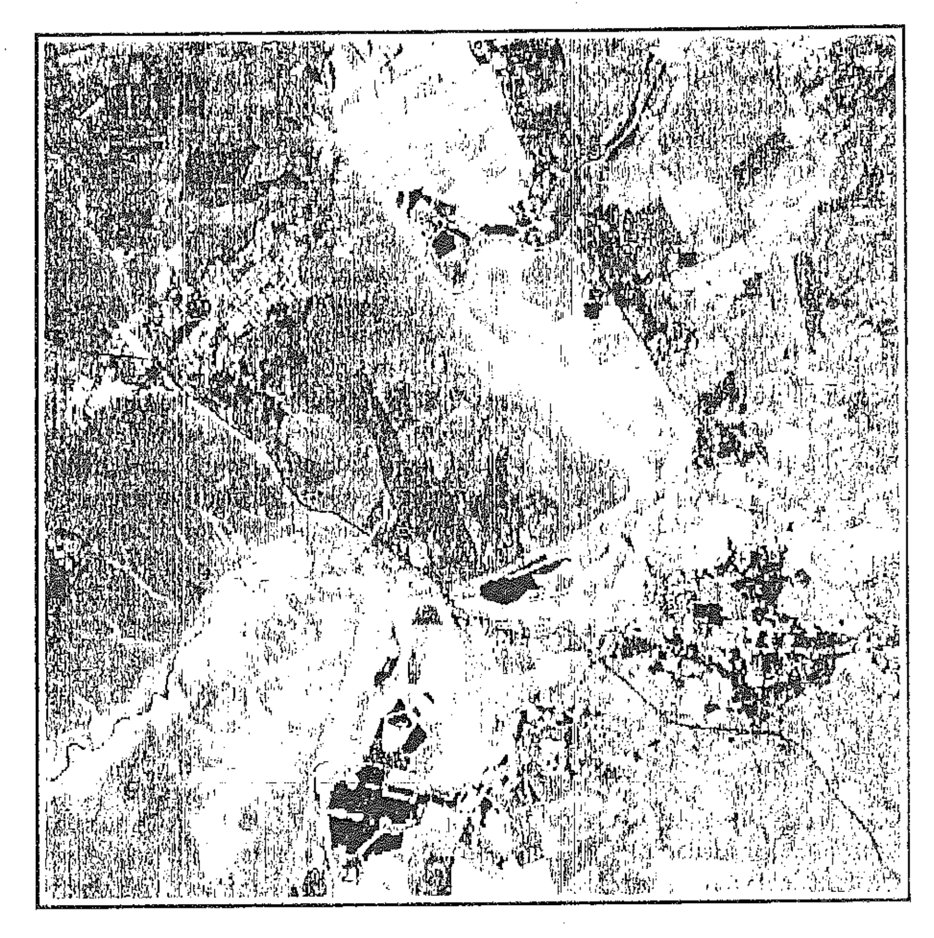


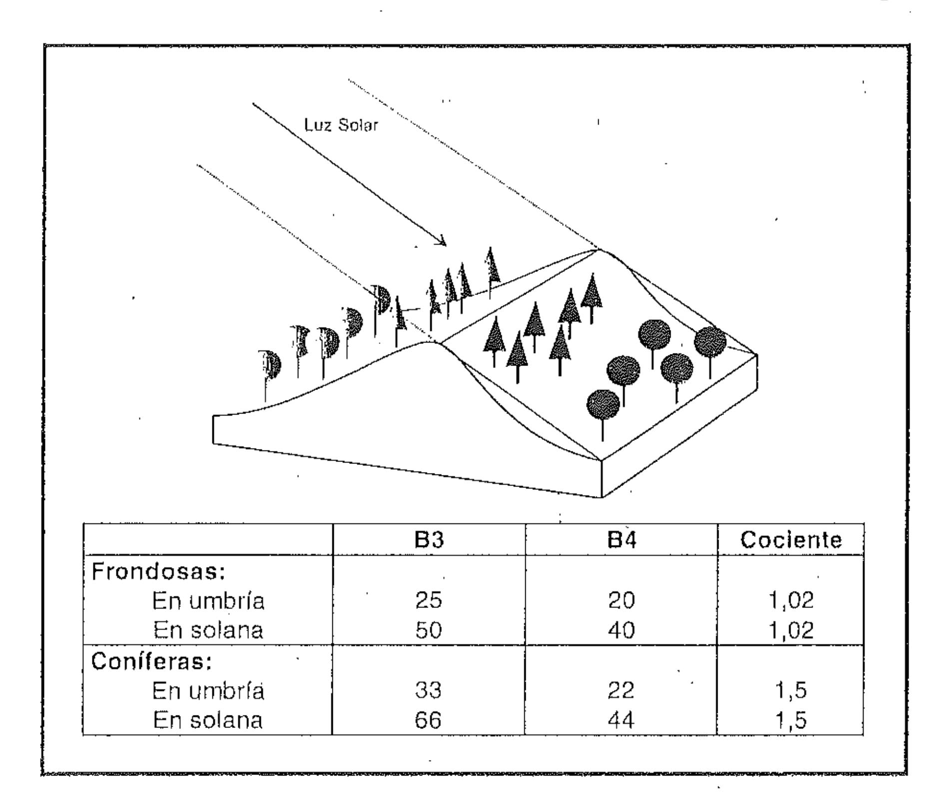
Fig. 7.8 - *Índice de vegetación de la imagen de Arganda*

aumentará la reflectividad en estas longitudes de onda. Aunque esto también se observa en el visible e infrarrojo cercano (por el deterioro en la actividad clorofílica y la estructura de la hoja), el efecto es más evidente en el infrarrojo medio. Esto ha llevado a algunos autores a formular un índice, denominado de estrés hídrico (*Moisture Stress Index*, MSI: Rock et al., 1986), definido como el cociente entre la reflectividad del infrarrojo medio y del infrarrojo cercano. A partir de este índice se han podido detectar daños a la vegetación causados por plagas, lluvia ácida o sequías, de forma más eficiente que con los índices de vegetación convencionales (Hunt y Rock, 1989; Vogelman, 1990; Cohen, 1991a)

Junto a los índices de vegetación, se han propuesto otros cocientes de bandas para enfatizar distintas cubiertas, especialmente en trabajos de exploración minera. Este tipo de estudios sólo parecen viables en áreas de vegetación escasa, con objeto de obviar el efecto pantalla de la cubierta vegetal. En un trabajo realizado

a partir de imágenes TM sobre el desierto del Mohave (California), se mostró el interés de los siguientes cocientes: TM5/TM7, para detectar rocas alteradas hidro-térmicamente, con alto contenido de arcillas, micas y rocas sulfatadas; TM5/TM4, para aislar las cubiertas vegetales del roquedo desnudo, y TM3/TM1, para aquellos materiales con importante presencia de limonita (Podwysocki et al., 1985).

En cuanto al empleo de los ratios de bandas para reducir el efecto del relieve en la caracterización espectral de cada cubierta, varios autores han mostrado el efecto homogeneizador de estas combinaciones aritméticas (Short, 1982; Colby, 1991). La reducción en la reflectividad que presenta una zona en sombra es, aproximadamente, proporcional en distintas bandas, por lo que un cociente tenderá a resaltar el contraste espectral frente al contraste de iluminación, más claro en las bandas originales. El ejemplo de la figura 7.9 puede servir para aclarar este punto: En las bandas 3 y 4, la superficie arbolada en solana presenta una reflectividad más alta que la medida en umbría. Si pretende discriminarse esta cubierta sobre las dos bandas originales, la dispersión será muy elevada, puesto que aparecerá un notable contraste entre ambas vertientes debido a la iluminación. Sin embargo,



	B3	B4	Cociente
Frondosas:			
En umbría	25	20	1,02
En solana	50	40	1,02
Coníferas:			
En umbría	33	22	1,5
En solana	66	44	1,5

Fig. 7.9 - *Empleo del cociente de bandas para reducir el efecto de contraste topográfico*

el cociente de las dos bandas, tiende a reforzar el carácter espectral propio de esa cubierta frente a otras, independientemente de la vertiente en que se encuentre.

Sea una u otra la aplicación final del cociente o índice de vegetación, habitualmente presentará unos valores muy limitados, que algunos equipos de tratamiento de imágenes, sólo capaces de almacenar valores enteros, no podrán aprovechar en su integridad. Convendrá, por tanto, escalar convenientemente el resultado, de tal forma que la imagen resultante esté en el rango 0 a 255, y pueda contrastarse visualmente el interés de la transformación.

Varias opciones permiten conseguir este objetivo. Una de las más empleadas comprende dos fases: en la primera se calcula el valor del cociente o índice de vegetación (IV) requerido, para todos los píxeles de la imagen; en la segunda, se expande el rango de ese índice para que varíe entre 0 y 255. Esta expansión es similar a las ya comentadas en el marco de los realces de la imagen. Por ejemplo, una expansión lineal se abordaría como:

$$C'_{i,j} = \frac{C_{i,j} - C_{min}}{C_{max} - C_{min}} * 255 \qquad [7.29]$$

donde $C'_{i,j}$ simboliza el valor del cociente o índice de vegetación ya realzado, y $C_{i,j}$ el original, para la misma posición en fila y columna.

En el caso de aplicar un cociente simple entre bandas puede aplicarse un realce en dos tramos. Puesto que el cociente original varía entre 1/255 y 255, puede reservarse la mitad del rango disponible (0 - 127) para los valores por debajo de 1, y el resto para los valores por encima de la unidad (Jensen, 1996). Basta aplicar:

$$C'_{i,j} = [\,(C_{i,j} \times 127) + 1\,] \text{ si } C_{i,j} < 1$$

y [7.30]

$$C'_{i,j} = [\,128 + (C_{i,j} / 2)\,] \text{ si } C_{i,j} > 1$$

A nuestro juicio, estas transformaciones no resultan muy adecuadas porque el intérprete pierde el sentido de los valores que está analizando, que están claramente acotados en la literatura, al menos para el caso del NDVI. En consecuencia, nos parece más oportuno que el escalado se realice por el propio intérprete con unas constantes conocidas, de tal forma que le resulte sencillo reconvertir el valor escalado al original. Una manera muy simple de escalar, en el caso del NDVI, es la siguiente:

$$NDVI' = (NDVI + 1) * 125 \qquad [7.31]$$

puesto que el NDVI original varía de -1 a +1, basta sumarle uno para eliminar valores negativos, y multiplicarlo por 125 para expandir el rango de 0 a 250. Sea éste o cualquier otro el escalado, obvia decir que ha de ser consistente para un conjunto de imágenes, si quieren realizarse análisis multitemporales.

7.1.4. Componentes principales

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es una técnica bastante empleada en ciencias sociales y naturales. Su objetivo es resumir un grupo amplio de variables en un nuevo conjunto, más pequeño, sin perder una parte significativa de la información original.

El origen de esta técnica parece arrancar del campo de la sicometría: al analizar una serie de test de inteligencia, se intuía la presencia de una serie de factores, subyacentes a las variables medidas, que podrían explicar gran parte de la variación común en determinados grupos de variables. Por ejemplo, se comprobó que las puntuaciones obtenidas por los alumnos de física y matemáticas tendían a estar bastante relacionadas, así como las obtenidas por otros en historia y literatura. Esto hacía pensar en la existencia de otras variables más complejas, como la habilidad para el cálculo o la capacidad de abstracción, que permitirían resumir la información contenida en las variables originales. Esas nuevas variables, los componentes o factores principales, podrían derivarse a partir de las variables originales, estudiando sus relaciones comunes tal y como se miden en la matriz de varianza-covarianza. Los factores o componentes principales vendrían, por tanto, a ser como variables-resumen de las medidas inicialmente: un menor número de dimensiones, preservando lo más sustancioso de la información original.

Esta capacidad de síntesis ha sido la base de la aplicación del ACP en teledetección. La adquisición de imágenes sobre bandas adyacentes del espectro, implica con frecuencia detectar una información redundante, puesto que los tipos de cubierta tienden a presentar un comportamiento similar en regiones próximas del espectro. Por ello, las medidas realizadas en una banda pueden presentar una importante correlación con las deducidas de otra, haciendo una o varias de ellas prácticamente irrelevantes. En este contexto, el ACP permite sintetizar las bandas originales, creando unas nuevas bandas —los componentes principales de la imagen—, que recojan la mayor parte de la información original. Esta síntesis resulta muy conveniente cuando se pretende abordar un análisis multitemporal (Joly et al., 1983; Maselli et al., 1995), o cuando se intentan seleccionar las tres bandas más adecuadas para una composición en color (Green et al., 1988).

Por otra parte, y desde el punto de vista meramente estadístico, el ACP facilita una primera interpretación sobre los ejes de variabilidad de la imagen, lo que permite identificar aquellos rasgos que se recogen en la mayor parte de las

bandas y aquellos otros que son específicos a algún grupo de ellas. En definitiva, proporciona una mejor distribución de los datos, frente a esos ejes de variabilidad, lo que puede facilitar una identificación más atinada de las distintas cubiertas.

Como es bien sabido, el sentido y la fuerza de la correlación lineal entre dos variables puede representarse gráficamente mediante un eje bivariado. En nuestro contexto, la nube de puntos indica la localización de los ND en las dos bandas consideradas. La elipse que limita estos puntos, expresa gráficamente la fuerza de la correlación entre las dos bandas, tanto mayor cuanto más se aproxime a una recta, o —dicho de otro modo— cuanto mayor sea el contraste entre los dos ejes de esa elipse. En la figura 7.10 aparece una correlación positiva elevada con dos ejes de variación: el primero en el sentido de la correlación (A), y el segundo en el sentido de los residuales (B). Conviene considerar que este segundo componente es perpendicular al primero, lo que indica, en términos estadísticos, que los componentes principales no están correlacionados; esto es, que la información que contienen es específica.

Gráficamente se intuye que una rotación de los ejes X,Y hacia las direcciones A, B, mejorará la disposición original de los datos, y probablemente también la separación entre los grupos de ND homogéneos en la imagen. Esa rotación se obtiene, simplemente, aplicando una función del tipo:

$$CP_i = a_{11} ND_i + a_{12} ND_k \qquad [7.32]$$

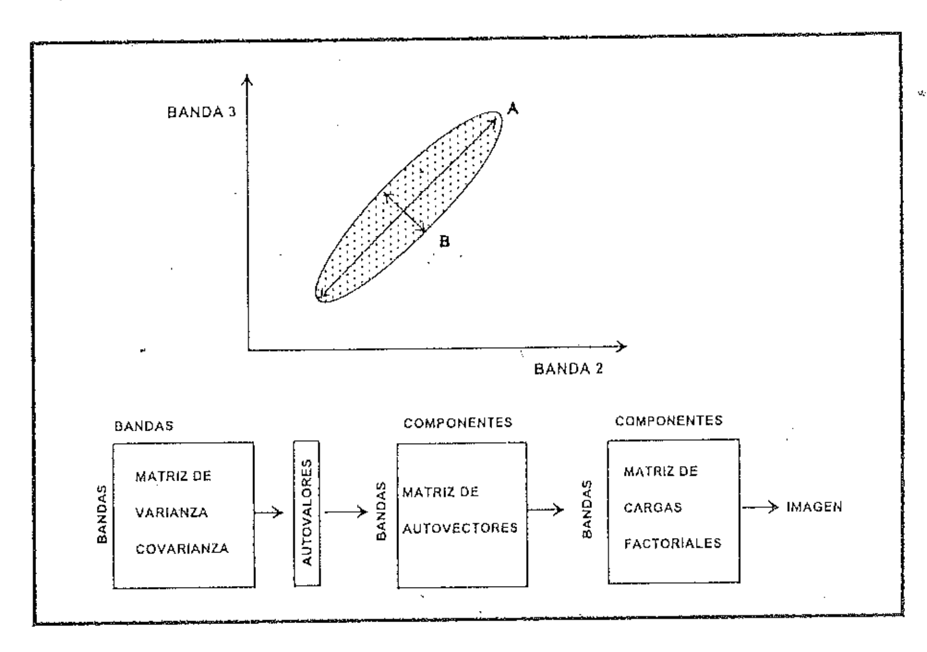


Fig. 7.10 - *Proceso aplicado a la obtención de Componentes Principales*

donde CP_1 indica el valor correspondiente al primer componente principal, obtenido a partir de los ND originales de las bandas **i** y **k**, tras aplicarles unos determinados coeficientes a_{11} y a_{12}. Desde el punto de vista geométrico, y como puede observarse en la figura 7.10, este nuevo eje sólo supone una rotación de los originales. En ocasiones, puede ser de gran interés acompañar la rotación con una traslación de los ejes, situando el origen de coordenadas en los valores mínimos de las dos bandas implicadas en el proceso. Basta, para ello, añadir dos constantes a_{01} y a_{02} a la ecuación arriba señalada.

En términos más generales, los componentes principales de una imagen se obtienen de acuerdo a:

$$CP_j = \Sigma_{i=1,p} a_{i,j} ND_i + R_j \qquad [7.33]$$

donde CP_j indica el ND correspondiente al componente principal **j**, $a_{i,j}$ el coeficiente aplicado al ND de la banda **i** para generar el componente **j** y R_j una constante que suele introducirse en cada componente para evitar valores negativos. Como hemos indicado, hay tantos componentes (**p**) como bandas, pero la forma de extraer esos componentes implica que sólo los primeros tienen una información significativa.

La obtención de los CP de una imagen implica una transformación matemática compleja, que no parece oportuno detallar aquí[1]. En términos sencillos, el proceso puede resumirse en los siguientes pasos. A partir de la matriz de varianza-covarianza de las bandas que componen la imagen original, se extraen los autovalores para cada uno de los componentes (λ_j). Los autovalores expresan la longitud de cada uno de los nuevos componentes, y, en última instancia, la proporción de información original que retienen. Este dato resulta de gran interés para decidir qué componentes principales son más interesantes; habitualmente los que mayor información original retengan. Tal y como se obtienen los CP, el autovalor va disminuyendo progresivamente, del primero a los últimos, pues se pretende maximizar sucesivamente la varianza extraída en el análisis. La varianza original explicada por cada componente se calcula como la proporción de su autovalor frente a la suma de todos los autovalores:

$$V_j = \frac{\lambda_j}{\Sigma_{j=1,p} \lambda_j} \qquad [7.34]$$

siendo **p** el número total de componentes.

[1] Un buen grupo de manuales de estadística recogen el desarrollo pormenorizado de esta técnica (Mather, 1976; Johnston, 1978). En el contexto del tratamiento digital de imágenes puede consultarse Short (1982, pp. 174 y ss), Gonzalez y Wintz (1977), Thomas et al. (1987a) y Richards (1993).

Junto a la longitud de cada eje, nos resulta también de gran interés conocer su dirección. En definitiva, para poder interpretar el sentido de las nuevas variables, se requiere conocer su relación con las originales. De igual forma, para calcular las ecuaciones que servirán para obtener las nuevas imágenes, se precisa contar con los coeficientes de la transformación. Ambos aspectos pueden abordarse a partir de los autovectores. El autovector indica la ponderación que debe aplicarse a cada una de las bandas originales para obtener el nuevo CP ($a_{i,j}$ en la fórmula anterior [7.33]). Dicho brevemente, equivale a los coeficientes de regresión en una transformación lineal estándar, siendo las bandas de la imagen las variables independientes y los CP las dependientes.

A partir de los autovectores, se calcula la matriz de correlación entre CP y bandas de la imagen, lo que nos permite conocer el sentido espectral de estos componentes. Basta aplicar:

$$r_{i,j} = \frac{a_{i,j}\sqrt{\lambda_j}}{s_i} \qquad [7.35]$$

donde $r_{i,j}$ indica el coeficiente de correlación entre el componente **j** y la banda **i**; $a_{i,j}$, el autovector de ese componente en la misma banda; λ_j, el autovalor del componente **j**, y s_i la desviación típica de la banda **i**.

El último paso es obtener una imagen de los componentes principales, utilizando la fórmula [7.33]. Obtenida la imagen de los CP, pueden éstos representarse en blanco y negro o color, obteniéndose una nueva visualización de la zona de estudio. Para ello, convendrá escalar los resultados en el rango más común en un equipo de visualización (0 a 255). Una forma sencilla de abordar este proceso, sería realizar una pequeña muestra de los valores resultantes, con objeto de estimar los valores máximos y mínimos, aplicando luego alguno de los procedimientos para expandir el contraste que se han mencionado anteriormente.

Para ilustrar el interés del ACP en la interpretación digital de imágenes, se aplicó esta técnica sobre la imagen de Arganda, que venimos comentando. A partir de una muestra sistemática de 1 de cada 8 píxeles, se obtuvo la matriz de varianza-covarianza para las siete bandas de la imagen (tabla 7.2)

Sobre esa matriz se calcularon los autovalores de la imagen, realizando una previa estandarización, con objeto de paliar el efecto de la distinta variabilidad entre bandas. Los autovalores (λ_j) extraídos fueron: 2176,98; 195,21; 170,27; 28,10; 16,84, y 1,55. De acuerdo a [7.34], la varianza original asociada con cada uno de estos componentes puede calcularse como: 84,09 % para el primer componente; 7,54 % para el segundo; 6,58 % para el tercero; 1,09 % para el cuarto; 0,65 % para el quinto, y 0,06 % para el sexto. De acuerdo a estos porcentajes, se

	B1	B2	B3	B4	B5	B7
B1	299,91					
B2	194,54	136,24				
B3	282,27	203,43	320,49			
B4	127,79	100,64	153,82	262,02		
B5	430,59	307,42	507,57	284,44	1126,8	
B7	285,19	203,64	332,78	144,07	669,94	443,52

Tabla 7.2 - *Matriz de varianza-covarianza de la imagen de Arganda*

seleccionaron únicamente los tres primeros componentes, que retenían un total del 98,21 % de la varianza original de la imagen.

El sentido espectral de estos componentes, se obtuvo a partir de la matriz de autovectores, en donde se evidencia la asociación entre cada componente y las bandas originales. Como puede analizarse en la tabla 7.3, el primer componente resultó un promedio ponderado de todas las bandas. Recogía, en consecuencia, una valoración de las características espectrales comunes a todas ellas, similar al componente Intensidad en la transformación HSI (6.6.4). El segundo componente mostraba con un significado más claro, pues presentaba una importante asociación positiva con la banda 4 y baja con las tres visibles, mientras ofrecía una correlación negativa en el infrarrojo medio. En definitiva, se trata de una valoración del vigor vegetal de la imagen. Finalmente, el tercer componente muestra el contraste entre las bandas visibles e infrarrojas, siendo positiva para las primeras, lo que indica una valoración del contenido de humedad.

Las imágenes de los CP resultantes parecen demostrar esta interpretación teórica. El primero presenta una fisonomía muy similar a la de una imagen pancromática, con un valoración indiferenciada de la mayor parte de las cubiertas: bajos valores en el agua y la vegetación, medios en los espacios edificados, y altos en los suelos desnudos (fig. 7.11a).

El segundo componente evidencia los sectores con una actividad clorofílica intensa, como son los cultivos en regadío (fig. 7.11b). Las áreas edificadas aparecen en tonos medios, mientras los matorrales y algunos suelos descubiertos ofrecen los tonos más oscuros.

	B1	B2	B3	B4	B5	B7
CP1	0,318	0,225	0,359	0,199	0,701	0,435
CP2	0,218	0,174	0,163	0,851	-0,306	-0,279
CP3	0,596	0,331	0,368	-0,448	-0,446	0,014

Tabla 7.3 - *Matriz de auto-vectores de la imagen de Arganda*



Fig. 7.11a - *Primer Componente Principal de la imagen de Arganda*

Por último, el tercer componente remarca con claridad las láminas de agua y espacios edificados, que ocupan el intervalo más alto de la imagen. Por el contrario, la vegetación manifiesta tonos gris-medio a oscuro, en función de su vigor, mostrando los matorrales tonos intermedios y los cultivos regados los más oscuros (fig. 7.11c)

La composición en color de los tres componentes resulta interesante para integrar las dimensiones de variación en la imagen captadas por el ACP. Se ha elegido la combinación 1, 2 y 3 (rojo, verde y azul), para enfatizar la representación visual de la vegetación y los suelos descubiertos (fig. 7.12*). Aquella aparece en tonos verdes, con distintos grados en función de su contenido de humedad y densidad, mientras éstos se manifiestan en tonos rojizos, que se convierten en magenta cuando hay una cubierta vegetal poco densa. Las zonas urbanas ofrecen colores magenta, mientras el agua presenta una tonalidad azul, ya que sólo en el tercer componente presenta un valor suficientemente alto.

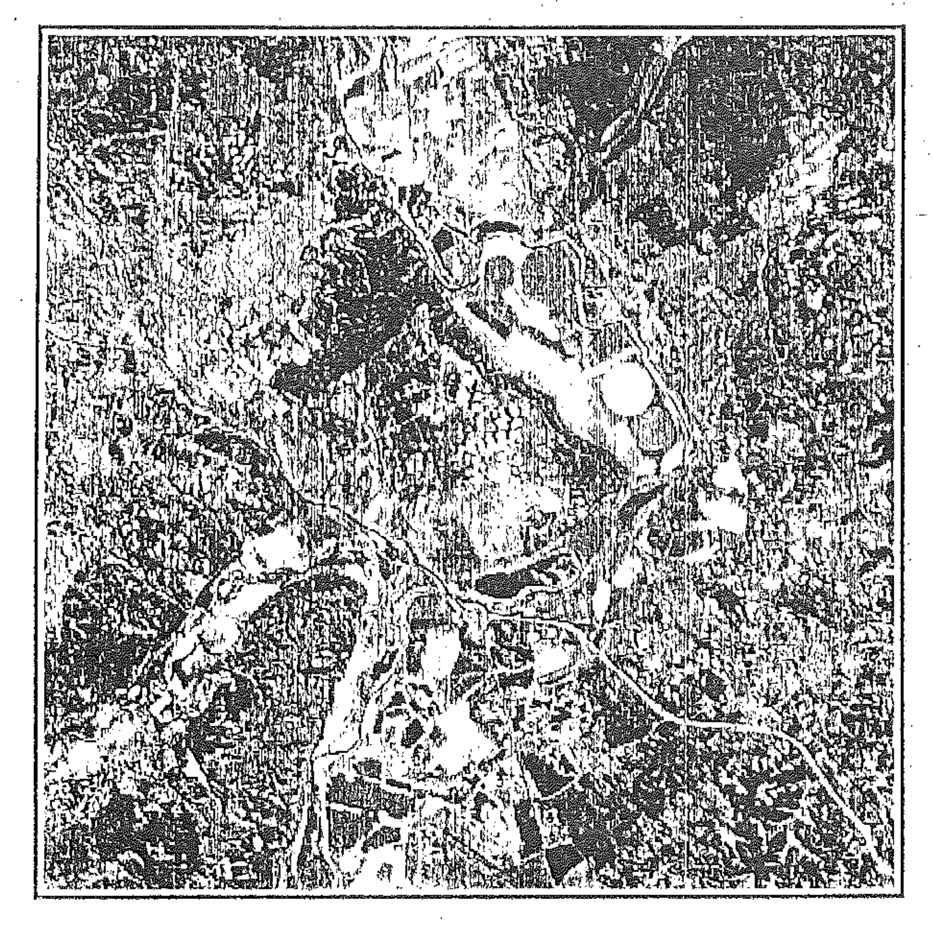


Fig. 7.11b - *Segundo Componente Principal de la imagen de Arganda*

La capacidad de síntesis propia del ACP la hacen una técnica muy apropiada como filtro previo para el análisis multiestacional, cuando varias imágenes se van a utilizar en una sola clasificación. En ese caso, el ACP sirve para retener la información más significativa de cada período. Posteriormente, los CP de cada fecha se combinan, con objeto de facilitar una mejor discriminación de cubiertas con perfiles estacionales marcados. Este tipo de planteamientos se siguieron en un trabajo de gran interés sobre l'Anse de l'Aguillon, en donde se seleccionó el primer CP de cuatro imágenes MSS de la misma zona, adquiridas en distintas estaciones, abordando posteriormente la clasificación sobre las cuatro fechas (Joly et al., 1983). En forma similar emplean esta técnica otros autores (Beer et al., 1978; Sicco, 1980; Meijerink y Donker, 1978; Schreier et al., 1982; Maselli et al., 1995; Siljestrom y Moreno, 1995). Más original resulta su aplicación para estudiar series temporales de imágenes en estudios sobre cambio global de la vegetación (Eastman y Fulk, 1993), lo que permite obtener, además de las tendencias generales de las cubiertas, información residual de gran interés para detectar anomalías. Posteriormente, analizaremos con más detalle el empleo del ACP como técnica para la detección de cambios entre dos imágenes de distinta fecha (ver cap. 7.3).

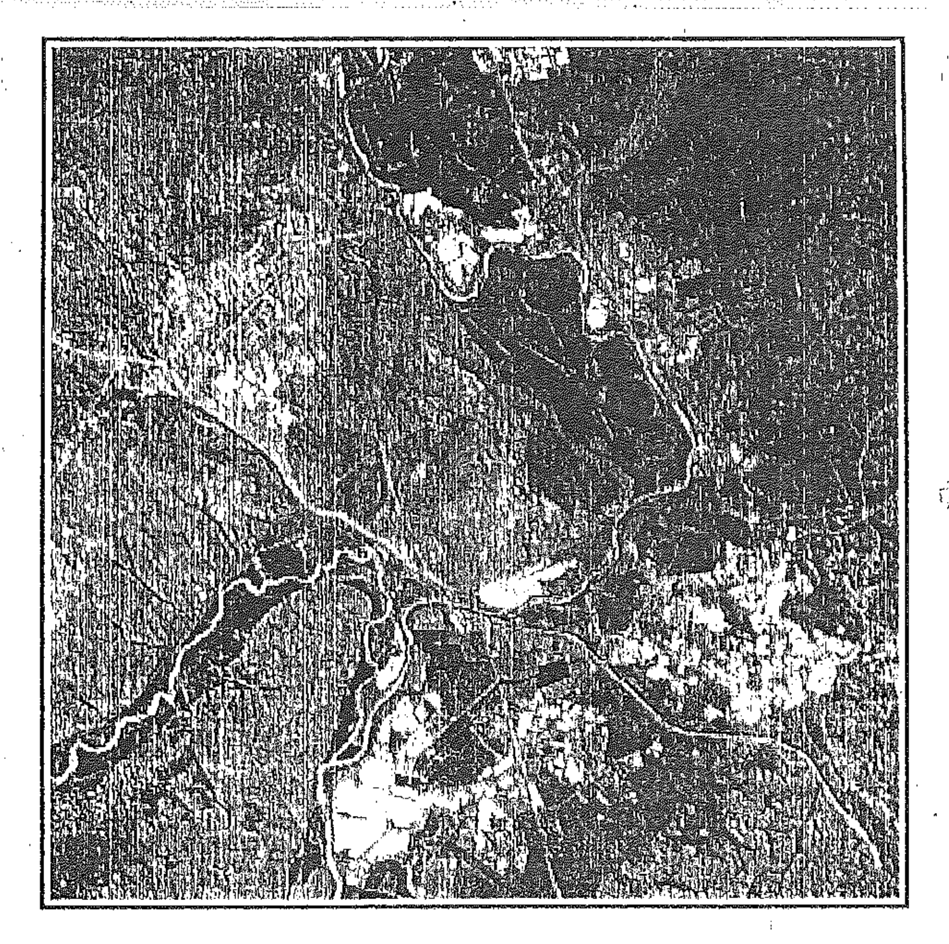


Fig. 7.11c - *Tercer Componente Principal de la imagen de Arganda*

En otro contexto, el ACP también se ha sugerido como alternativa para fundir datos de sensores de distinta resolución (Chavez et al. 1991). En este caso, en lugar de sustituir el canal pancromático SPOT por el componente Intensidad, se sustituye por el primer CP, que es el que recoge el brillo o intensidad general de la imagen, retornando posteriormente a las variables originales con la transformación inversa. También otros autores han mostrado el interés de esta técnica para realzar el análisis visual de composiciones coloreadas (Chavez y Kwarteng, 1989).

Un problema inherente al ACP es la dificultad de establecer una interpretación *a priori* de los componentes, ya que la transformación es dependiente de la

escena. Algunos autores sugieren que el primer componente siempre indica el brillo general y el segundo el verdor (Ingebritsen y Lyon, 1985). No obstante, esta afirmación asume que en la imagen existe una cantidad suficiente de cobertura vegetal. De otra forma, el componente de vegetación puede ser el tercero o cuarto. En definitiva, no pueden aplicarse reglas generales para la interpretación de los CP.

7.1.5. Transformación *'Tasseled Cap'* (TTC)

Al igual que el ACP, esta transformación se dirige a obtener unas nuevas bandas, por combinación lineal de las originales, con objeto de realzar algunos rasgos de interés en la escena. La diferencia frente al ACP estriba en que la TTC ofrece unos componentes de significado físico preciso, esto es, independientes del tipo de imagen que se esté analizando.

La TTC fue ideada por Kauth y Thomas en el marco del proyecto LACIE (*Large Area Crop Inventory Experiment*), desarrollado por la NASA y el Departamento de Agricultura estadounidense (USDA) en los años 70, con objeto de mejorar la predicción de cosechas. Dentro de este proyecto, se pretendió modelar los componentes fundamentales de variación en una imagen MSS, describiendo sus características físicas desde el punto de vista del seguimiento de cultivos (Kauth y Thomas, 1976). A partir de una serie de imágenes de zonas agrícolas, se trató de sintetizar los ejes de variación espectral de los cultivos en una figura tri-dimensional, de aspecto parecido a un gorro con borlas (*tasseled cap*). Considerando las bandas roja e infrarroja, la base de ese gorro se define por la línea de suelos, en donde se sitúan los distintos tipos de suelo, de acuerdo a su color (fig. 7.13). Según el cultivo va ganando en vigor, tiende a aproximarse al eje de la banda infrarroja, convergiendo en un punto cuando se produce la máxima madurez. A partir de ahí el cultivo tiende a marchitarse, retornando hacia la línea de suelos.

La TTC tiende a poner más en evidencia el comportamiento espectral de la vegetación y el suelo, a partir de crear nuevos ejes mejor ajustados a ese espacio físico. En ese nuevo sistema de coordenadas, se pretende que sea más nítida la separación entre ambas cubiertas. Para el caso de las imágenes MSS, sobre las que se desarrolló esta transformación, los nuevos ejes se obtuvieron a partir de:

$$\mathbf{u}_j = \mathbf{R'}_i \, \mathbf{x}_i + \mathbf{c} \qquad [7.36]$$

donde $\mathbf{u}_j$ indicaba el vector correspondiente a la imagen transformada; $\mathbf{x}_i$, el vector de entrada; $\mathbf{R'}_i$, el vector de coeficientes de transformación, y $\mathbf{c}$ una constante para evitar valores negativos. Los autores sugerían un valor c = 32.

Sobre el conjunto de imágenes de su muestra, los autores del trabajo distinguían tres componentes: uno denominado brillo (*brightness*), suma ponderada

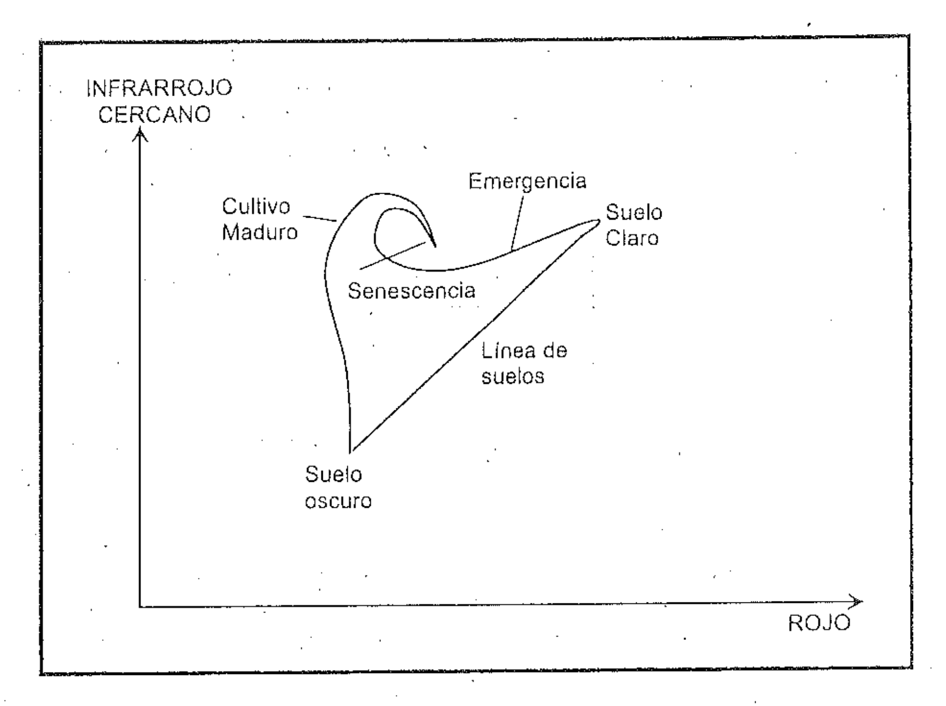


Fig. 7.13 - *Fundamento de la transformación* Tasseled Cap

de las cuatro bandas originales; otro, denominado verdor (*greenness*), relacionado con la actividad vegetativa; un tercero conocido como marchitez (*yellowness*), que pretendía relacionarse con la reducción en el vigor vegetal, y un cuarto sin significado aparente (*nonsuch*).

En un primer momento, esta transformación no tuvo mucho eco en la literatura científica, frente a otros índices y transformaciones. En los años 80, sin embargo, se empleó con mayor profusión. Crist y Cicone realizaron diversos trabajos a partir de la TTC, mostrando su aplicabilidad a otros sensores, principalmente al TM y AVHRR (Crist y Cicone, 1984a, 1984b; Cicone y Metzler, 1984). Para el caso del sensor TM, la tabla 7.4 recoge los coeficientes propuestos por Crist y Cicone (1984c) para derivar los tres principales ejes de la TTC.

	B1	B2	B3	B4	B5	B7
BRILLO	0,3037	0,2793	0,4743	0,5585	0,5082	0,1863
VERDOR	-0,2848	-0,2435	-0,5436	0,7243	0,0840	-0,1800
HUMEDAD	0,1509	0,1973	0,3279	0,3406	-0,7112	-0,4572

Tabla 7.4 - *Coeficientes propuestos para la obtención de la TTC a partir de una imagen Landsat-TM (Crist y Cicone, 1984c)*

En trabajos comparativos sobre la aplicación de la TTC a imágenes MSS y TM, se ha puesto de manifiesto la presencia —en el caso de este último sensor— de un nuevo componente, denominado Humedad (*Wetness*), estrechamente relacionado con la información que el TM proporciona del infrarrojo medio y que resulta original frente al sensor MSS. En consecuencia, una imagen TM presenta tres ejes principales de variación:

(i) Brillo (*Brightness*), que refleja los cambios en la reflectividad total de la escena. Como puede apreciarse en la tabla 7.4 se trata de una suma ponderada de todos los canales, excluido el térmico.

(ii) Verdor (*Greenness*), que indica el contraste entre las bandas visibles y el infrarrojo próximo. Destaca la intervención de la banda 4, la ponderación negativa de las visibles y la anulación mutua de las dos en el infrarrojo-medio.

(iii) Humedad (*Wetness*), que se relaciona con el contenido de agua en la vegetación y en el suelo, y se marca por el contraste entre el infrarrojo medio, en donde se manifiesta con mayor claridad la absorción del agua, y el resto de las bandas. Otros autores han propuesto denominar a este componente *Maturity* puesto que se ha encontrado una clara relación entre él y la madurez de la cubierta vegetal. Por ejemplo, en un inventario forestal desarrollado en Oregon, se obtuvieron muy buenas correlaciones entre este componente y las variables medidas en el terreno, siendo un magnífico indicador de la edad y densidad de la cobertura forestal. Además se observó que era el componente menos afectado por la topografía (Cohen y Spies, 1992).

La combinación de estos ejes, permite distinguir varios planos de variación (fig. 7.14), de gran interés para el estudio detallado de suelos y vegetación. En este sentido, suelen distinguirse tres planos: el de vegetación, formado por el eje de brillo y de verdor, el de suelos, formado por el brillo y la humedad, y el de transición, formado por la humedad y el verdor (Crist y Cicone, 1984c).

Una de las ventajas de esta transformación frente al ACP radica en su interpretabilidad física. En efecto, los componentes deducidos a partir de la TTC tienen un significado preciso, independiente de las condiciones de la escena, puesto que se apoyan sobre las características de las bandas espectrales en consideración. Por tanto, los coeficientes propuestos pueden aplicarse a distintas imágenes del mismo sensor, con las salvedades propias de considerar que fueron extraídos a partir de los rasgos agrícolas del *Mid-West* americano. Otro factor a tener en cuenta sería el referente al escalado de la imagen resultante, que varía notablemente según la fecha del año y las condiciones de iluminación. Puede emplearse, a este respecto, alguno de los procedimientos aplicados anteriormente para cocientes e índices de vegetación.

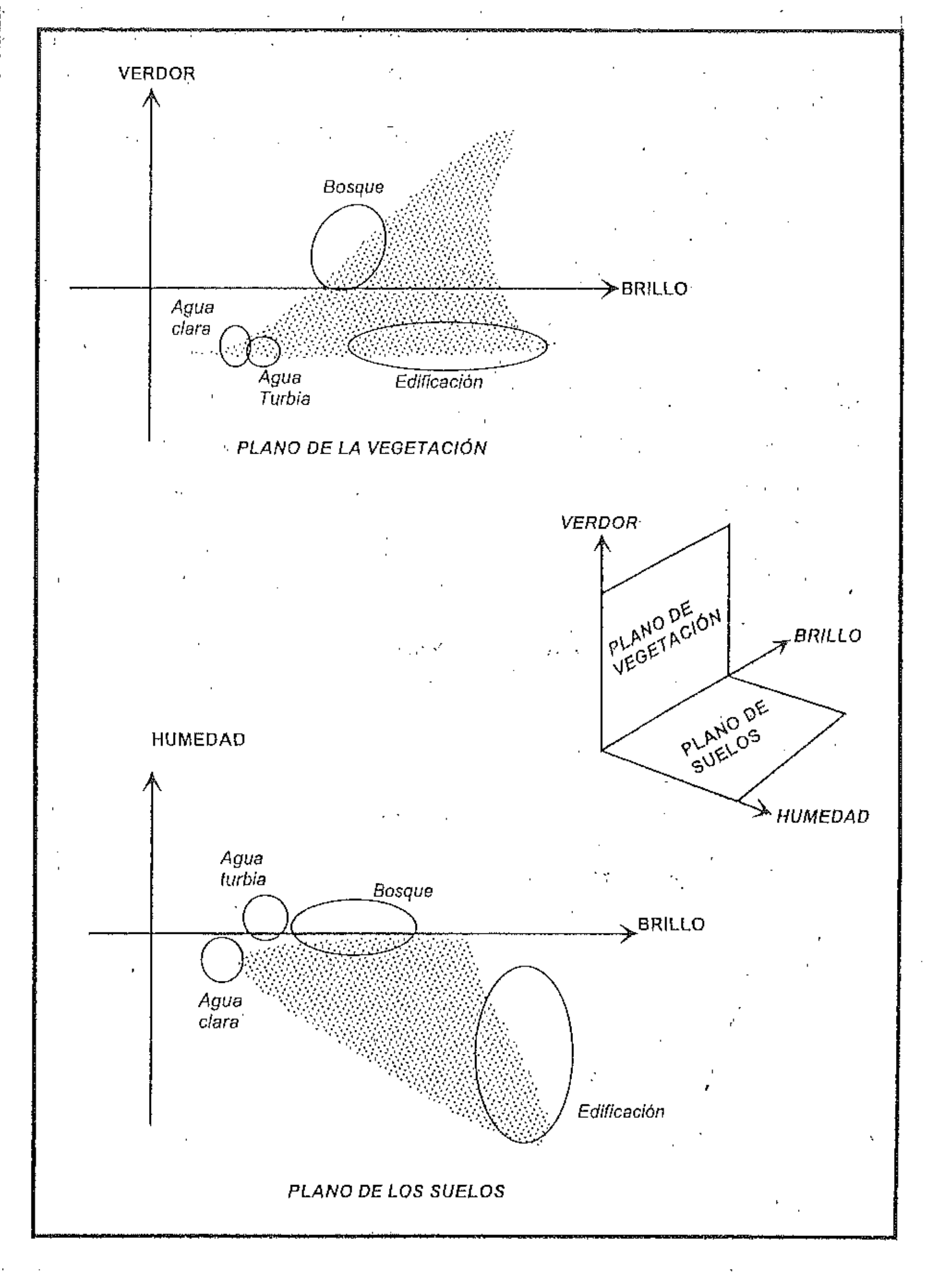


Fig. 7.14 - *Planos de variación en una transformación TC*

La TTC cuenta ya con un importante rango de aplicaciones (Crist y Cicone, 1984b; Cicone y Metzler, 1984; Perry y Lautenschlager, 1984; García et al., 1986). De modo esporádico se ha utilizado para la corrección atmosférica (Labuto, 1991)

y para homogeneizar radiométricamente una serie multitemporal de imágenes (Hall et al., 1991a).

De acuerdo a los coeficientes propuestos por Crist y Cicone, se ensayó la aplicación de la TTC sobre la imagen de Arganda. Esto permitió obtener tres nuevas imágenes, por combinación lineal de los seis canales no térmicos del TM (fig. 7.15). El primero de los componentes deducidos, el conocido como Brillo, aparece como una imagen pancromática, por cuanto se trata de una combinación ponderada de las diferentes bandas. En este sentido, presenta rasgos muy similares a la imagen del componente principal 1.

El componente de Verdor, refleja con gran claridad los dominios vegetales presentes en la imagen. Destaca el contraste entre los espacios edificados y suelos desnudos frente a las cubiertas vegetales, principalmente a los cultivos regados, aunque también resultan evidentes las urbanizaciones ajardinadas. Los tonos más oscuros aparecen en suelos descubiertos, áreas edificadas y vías de comunicación (se marca con claridad la variante de la N-III por Arganda, que estaba construyéndose cuando se adquirió la imagen).

Por último, el componente de Humedad resulta muy original, en el contexto de las operaciones comentadas en este capítulo, por cuanto ofrece una información no recogida en otras transformaciones. Se manifiestan claramente los cursos y láminas de agua, así como sectores urbanos que tienden a estar más húmedos en esta época veraniega: zonas cubiertas de vegetación o de entramado abierto. Los tonos más oscuros se presentan en los suelos desnudos o ya cosechados, cubiertos por rastrojeras.



Fig. 7.15a - *Componente* Brightness *de la imagen de Arganda*

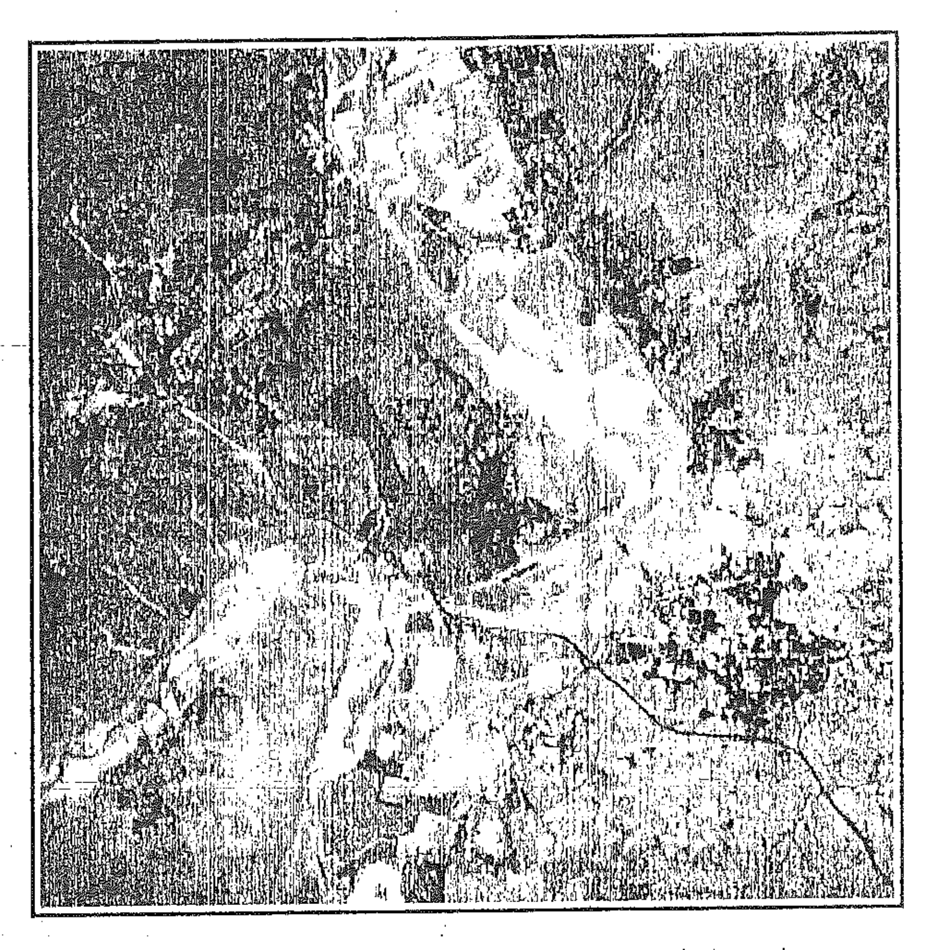


Fig. 7.15b - *Componente* Greeness *de la imagen de Arganda*

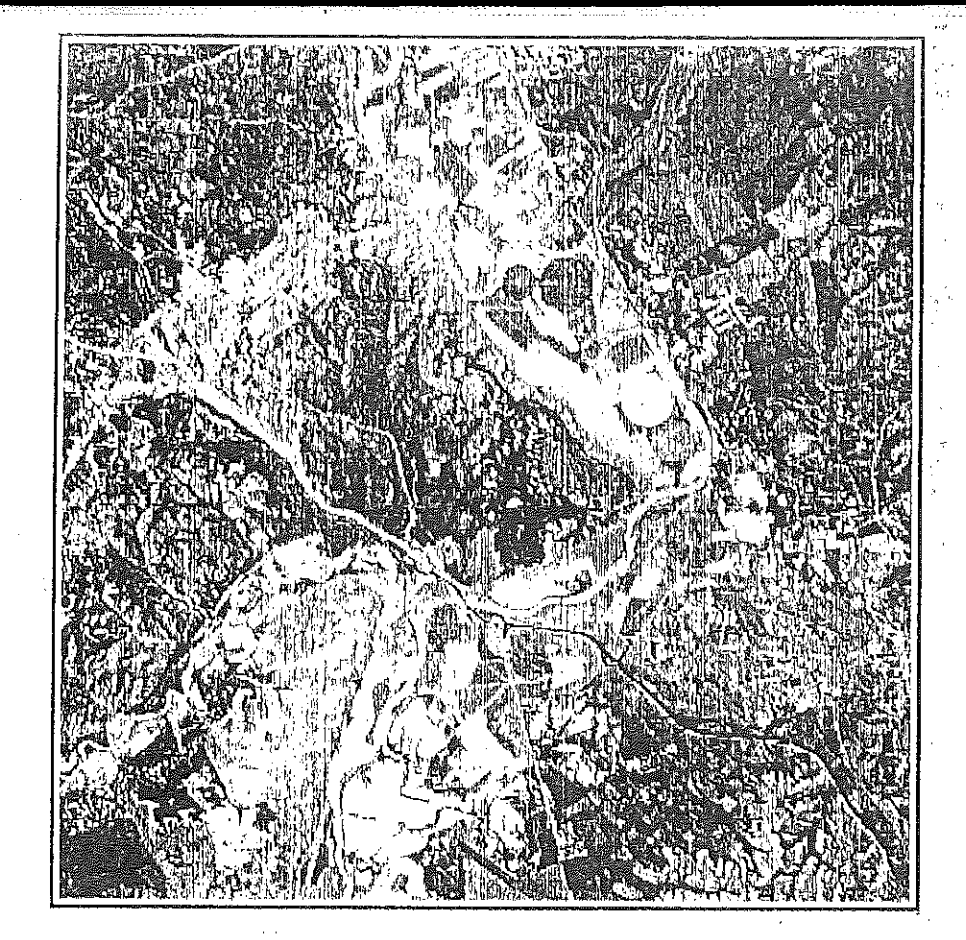


Fig. 7.15c - *Componente* Wetness *de la imagen de Arganda*

La composición coloreada de los tres componentes resulta también muy expresiva (fig. 7.16*). Con tonos cian se recogen las zonas cubiertas por vegetación, tanto más anaranjadas cuanto menor vigor (caso de algún pívot de regadío ya cosechado). Las zonas urbanas densas aparecen en tonos magenta o azulados, los primeros correspondientes a áreas de edificación más densa, mientras los segundos a espacios donde la vegetación está más presente. Los suelos desnudos o con rastrojeras, por su parte, presentan tonos rojizos, que se convierten en azules en presencia de matorral de bajo porte.

A partir de ésta, y las demás transformaciones que hemos estudiado en el presente capítulo, pueden abordarse tareas de análisis visual o de clasificación digital, en función del objetivo temático marcado en el estudio. En cualquier caso, son muy útiles para adquirir una mejor comprensión de las características de la imagen, del sentido espectral de la información que proporciona, y de sus principales ejes de variabilidad.

7.1.6. Extracción de información sub-píxel: análisis lineal de mezclas espectrales

Tradicionalmente la clasificación de imágenes de satélite ha tenido por misión asignar cada píxel a una, y sólo una, de las categorías previamente definidas en la leyenda de trabajo.

Con ser de gran interés este planteamiento, como veremos en el próximo capítulo, resulta un enfoque algo limitado para ciertas aplicaciones. La necesidad de categorizar cada píxel de la imagen con un código exclusivo implica asumir que ese píxel es homogéneo o, dicho de otra forma, que toda su superficie está cubierta por la categoría a la que se ha asignado. En definitiva, esa clasificación de la imagen no considera que la radiancia proveniente de un píxel, en la mayor parte de las ocasiones, es una mezcla de distintas cubiertas, y que al clasificarlo simplemente optamos por asignarlo a la cubierta dominante en esa parcela. A efectos de la representación cartográfica convencional, éste es el objetivo habitual, ya que los mapas temáticos asumen que cada unidad es homogénea: una misma parcela no puede asignarse a dos o más categorías. Cuando en realidad existe esa mezcla, que va más allá de la mínima unidad cartografiable a una determinada escala, las opciones más empleadas han sido, o bien simplificar la realidad, prescindiendo de las categorías menos representativas, o bien generar categorías mixtas, en donde la realidad se etiqueta considerando esa difícil separación en componentes. Las denominaciones «mosaico de cultivos» o «matorral arbolado» son ejemplos de este segundo enfoque.

Una alternativa a ambos planteamientos es emplear técnicas que permitan extraer información sobre el grado de mezcla presente en cada píxel. En otras palabras, se trataría de obtener imágenes que nos indiquen la proporción de cada categoría de interés en un píxel, asumiendo que la respuesta recibida por el sensor es, de alguna forma, una combinación de signaturas espectrales puras. La obtención de estos componentes sub-píxel no es una tarea reciente en teledetección, pues ya se ofrecen soluciones de gran interés en los años 70 (Marsh et al., 1980). Sin embargo, sólo en los últimos años se ha extendido su empleo, especialmente a partir del uso masivo de imágenes de baja resolución espacial, como las proporcionadas por el AVHRR, en donde es especialmente crítico obtener información sobre la mezcla en el interior de un píxel.

Una de las técnicas de mayor proyección en este sentido es el análisis lineal de mezclas espectrales (ALME)[2], que pretende obtener imágenes con la

[2] En inglés, *Spectral Mixture Analysis* (SMA) o *Linear Mixture Analysis* (LMA).

proporción de cada píxel ocupado por una determinada categoría. En otras palabras, como fruto de esta técnica, obtenemos tantas imágenes de salida como categorías pretendan estudiarse. En cada una de ellas, el ND de un determinado píxel indica el porcentaje de superficie que ocupa esa categoría (Fig. 7.17).

El ALME parte de algunos supuestos que conviene considerar antes de analizar el gran potencial de esta técnica, pues también nos ayudarán a valorar sus limitaciones. En primer lugar, se asume que la radiación recibida por el sensor desde cada tipo de cubierta se restringe al ámbito de la parcela ocupada por ese píxel; en otras palabras, que no está influyendo en la radiación reflejada la señal procedente de una cubierta vecina (Settle y Drake, 1993). En caso de píxeles que contengan más de un tipo de cubierta, la segunda asunción considera que su radiancia global es proporcional a la superficie ocupada por cada cubierta. Esto equivale a que no exista una cubierta que tienda a, por decirlo así, «ensombrecer» al resto, provocando una ponderación superior a su propia superficie en la radiación finalmente reflejada al sensor. La linealidad de la mezcla es asumible sólo en las bandas del espectro óptico, no en el térmico. Por último, y más importante aún, se asume en el ALME que existen signaturas espectrales puras, válidas para toda la zona analizada (Quarmby et al., 1992).

Si estas tres suposiciones son admisibles, podemos asumir que la radiancia de un determinado píxel con mezcla es una combinación lineal de la radiancia

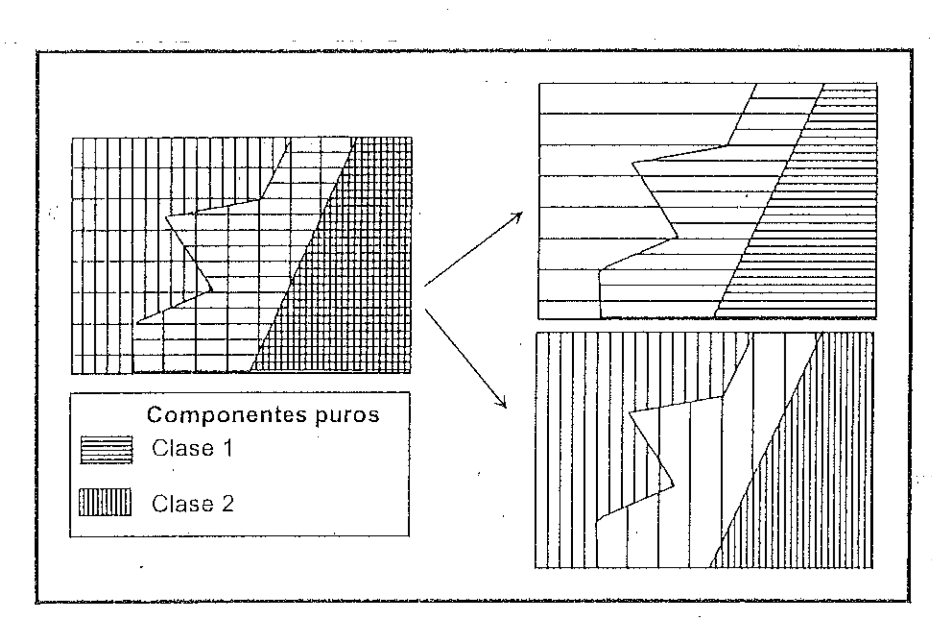


Fig. 7.17 - *Conceptos básicos en el ALME : los datos de la imagen son mezcla de diversas proporciones de los componentes puros*

característica de unas cubiertas o componentes característicos (clases puras), en proporción equivalente a la superficie que ocupan. En definitiva, se cumple la fórmula siguiente (Shimabukuro y Smith, 1991):

$$\rho_{i,j,k} = \Sigma_{m=1,p} F_{i,j,m} \rho_{m,k} + e_{i,j,k} \qquad [7.37]$$

donde $\rho_{i,j,k}$ indica la reflectividad observada en el píxel **i,j** en la banda **k**; $F_{i,j,m}$ es la proporción del componente **m** en ese píxel para cada una de las **p** categorías puras; $\rho_{m,k}$ corresponde a la reflectividad característica de ese componente **m** en la banda **k**, y $e_{i,j,k}$ es un término del error asociado a la estimación de las proporciones en cada píxel **i,j**.

La proporción de cada componente puro (F_m) debe ser tal que:

$$0 \leq F_{i,j,m} \leq 1 \qquad [7.38]$$

esto es, no puede haber proporciones negativas, y

$$\Sigma_{m=1,p} F_{i,j,m} = 1 \qquad [7.39]$$

la suma de las proporciones para todos los componentes es igual a la superficie total del píxel.

La ecuación [7.37] también puede expresarse en términos de ND, en lugar de reflectividad, siempre que no se modifique la linealidad frente a la información inicialmente detectada por el sensor. El interés de presentar la fórmula en magnitudes físicas se relaciona con la primera fase, y más importante, del ALME: definir con precisión los componentes puros de los que van a obtenerse las imágenes «desmezcladas». Estos componentes —que también se denominan, en la bibliografía anglosajona, «miembros terminales» (*endmembers*) de la imagen—, son las cubiertas básicas presentes en la misma. Se asume que el resto de situaciones que se presentan en la imagen son mezcla de ellas. Por ejemplo, los componentes puros de una imagen podrían ser la vegetación sana, el suelo y las sombras, para un estudio de deforestación (Holben y Shimabukuro, 1993; Adams et al., 1995); las plantaciones forestales vigorosas, las recientemente cortadas y las que ofrecen un proceso de regeneración, en el caso de un estudio forestal (Hlavka y Spanner, 1995); la vegetación sana, la quemada y las sombras, para una cartografía de incendios forestales (Caetano et al., 1994), o los tipos de cultivo para un inventario de cosechas (Quarmby et al., 1992). Una limitación importante del ALME es que el número de componentes puros de una imagen no debe superar al número de bandas más uno utilizado para el cálculo de las fracciones. Esto se explica por los requerimientos del método matemático para solucionar el problema, como luego veremos.

Se recomienda obtener los valores característicos de cada componente ($\rho_{m,k}$) a partir de curvas de laboratorio. Esto permite controlar mejor su pureza, evitando efectos anómalos a la cubierta, como serían las condiciones topográficas o del sustrato. Sin embargo, esta opción tiene notables inconvenientes, como asumir que las imágenes están adecuadamente calibradas y corregidas del efecto atmosférico y topográfico, lo que, como ya hemos visto, no resulta trivial. Por esta razón, en buena parte de los estudios publicados, la delimitación de las radiancias características se realiza sobre la propia imagen, señalando en ella áreas puras, y suficientemente representativas, de las cubiertas que se vayan a «desmezclar». En caso de trabajar con imágenes AVHRR, localizar áreas homogéneas resulta muy complicado, dado el tamaño del píxel. Como precisamente sobre estas imágenes resulta de mayor interés la aplicación de esta técnica —ya que facilita información sub-píxel que enriquece mucho las posibilidades temáticas de este sensor—, se ha optado por deducir las características espectrales de los componentes puros a partir de imágenes de alta resolución, como SPOT o TM, previamente registradas y calibradas con las AVHRR. A partir de ellas, se generan los valores característicos de cada componente puro, mediante técnicas de regresión o degradando artificialmente las imágenes de alta resolución hasta obtener el tamaño del píxel AVHRR (Quarmby et al., 1992; Holben y Shimabukuro, 1993; Foody y Cox, 1994; Hlavka y Spanner, 1995; Kerdiles y Grondona, 1995; Caetano et al., 1994).

Una vez obtenidas las reflectividades o ND característicos de cada componente puro, pueden generarse las imágenes de las proporciones ($F_{i,j,m}$) solucionando para cada píxel la ecuación [7.37]. Normalmente, las proporciones se obtienen de tal forma que se minimice el error residual de cada píxel ($e_{i,j,k}$). Por ello, puede re-escribirse la fórmula [7.37] en función del error:

$$e_{i,j,k} = \rho_{i,j,k} - \Sigma_{m=1,p} F_{i,j,m}\, \rho_{m,k} \qquad [7.40]$$

de tal forma que los valores a estimar ($F_{i,j,m}$) permitan minimizar el error (o más concretamente, el cuadrado de los errores). Este es el criterio denominado de ajuste por mínimos cuadrados, que tiene dos modalidades de solución: el ajuste con restricción y el ajuste ponderado (Shimabukuro y Smith, 1991).

Supongamos un ejemplo muy sencillo, como es el que aparece en la figura 7.18. Se parte de los ND de dos bandas (B1 y B2) y se pretende deducir las proporciones, para cada píxel, de dos miembros puros (c_1 y c_2), definidos por unos ND puros en las dos bandas (35 y 40, respectivamente, para la clase 1, y 75 y 70 para la clase 2). Con esos datos, deberían generarse dos imágenes de proporciones, una correspondiente a c_1 y otra a c_2. Para ello, suponiendo en el ejemplo que no existe error (esto es que las estimaciones son perfectas en cada píxel) es preciso solucionar un sencillo sistema de ecuaciones con dos incógnitas. Por ejemplo, para el primer píxel (superior, izquierda) tendríamos:

Valores Puros

Clase	Banda 1	Banda 2
1	35	40
2	75	70

Datos de la Imagen

B1			B2		
43	51	55	46	52	50
47	55	59	49	55	58
51	63	80	52	61	64

Proporciones de cada categoría (ALME)

F1			F2		
0,8	0,6	0,5	0,2	0,4	0,5
0,7	0,5	0,4	0,3	0,5	0,6
0,6	0,3	0,2	0,4	0,7	0,8

Fig. 7.18 - *Ejemplo de cálculo de las proporciones ALME*

$$43 = 35\, F_1 + 75\, F_2$$

$$46 = 40\, F_1 + 70\, F_2$$

esto es, el ND observado para ese píxel en las dos bandas (43, 46), se asume que está formado por una combinación lineal de las categorías puras c_1 y c_2, definidas por sus ND característicos en esas dos bandas. Para conocer la proporción de cada clase presente en ese píxel, basta despejar en cada una de las ecuaciones F_2 para obtener F_1:

$$(43\text{-}35\, F_1) / 75 = (46 - 40\, F_1) / 70$$

de donde se deduce que $F_1 = 0{,}8$ y, en consecuencia, que $F_2 = 0{,}2$. De igual forma se procede con el resto de los píxeles de esta imagen, obteniéndose la matriz de proporciones resultante (figura 7.18). En este caso, asumiendo que no hay error residual en la estimación de las proporciones, bastaría en realidad con una sola ecuación, ya que, si se cumplen las restricciones de no-negatividad y exhaustividad que require el ALME, entonces F_2 puede despejarse a partir de F_1 (F_2=1-F_1). En suma, podríamos obtener el valor de F_1 a partir de una sola banda:

$$43 = 35\, F_1 + 75\, (1\text{-}F_1)$$

En definitiva, como es necesario contar con tantas ecuaciones como incógnitas, podemos seleccionar hasta un máximo de tantos componentes puros como bandas haya disponibles. Sin embargo, si añadimos el requisito de exhaustividad (la suma de las proporciones es igual 1), estamos incluyendo una ecuación adicional en el problema; de ahí, que pueda incluirse hasta un máximo de k+1 componentes, siendo k el número de bandas. Esto siempre que supongamos nulo el error, de otra forma, se incluye una incógnita más, y habría que limitar el número de componentes al de bandas.

El método para solucionar esos sistemas de ecuaciones es más complejo, lógicamente, al incluido en nuestro ejemplo. En consecuencia, es preciso abordar criterios más refinados para solucionar el sistema de ecuaciones planteado anteriormente. Entre los diversos procedimientos que se han propuesto para ello, el estimador más sencillo es el ajuste por mínimos cuadrados sin restricciones. En notación matricial, este estimador se expresa como (Settle y Drake, 1993; Gong et al., 1994):

$$\hat{f} = (M^T M)^{-1} M^T X \qquad [7.41]$$

donde f indica el vector con las proporciones calculadas para cada píxel, M indica el vector con los valores medios de los componentes puros en las bandas de análisis y X el vector con los valores del píxel en cuestión para esas mismas bandas. El superíndice T indica la transpuesta de la matriz y -1 la inversa. Este algoritmo es relativamente rápido pero no satisface las restricciones antes mencionadas. Para solucionar esto, basta con poner a cero los valores negativos de f y escalar el resto para que sumen 1. Otros criterios de solución, que incluyen directamente estas restricciones pueden consultarse en Settle y Drake (1993) y Shimabukuro y Smith (1991).

El ALME se propuso inicialmente en los años 70, pero apenas ha tenido eco hasta fecha muy reciente. Las perspectivas de nuevos sensores de alta resolución espectral pueden implicar un notable crecimiento de esta técnica[3] (Gong et al., 1994). Además, resulta muy apropiada para expresar el carácter continuo de los datos ambientales, que no tienen una clara solución de continuidad en el espacio. Por último, resulta muy atractiva como técnica para enriquecer la información proporcionada por los sensores de baja resolución espacial, singularmente del AVHRR, ya que facilita un detalle espacial clave para muchas aplicaciones, manteniendo su alta frecuencia de adquisición y bajo coste. El campo más claro de aplicación es el agrícola: superficie cultivada y rendimiento, en donde el ALME ha mostrado ya excelentes resultados (Quarmby et al., 1992; Kerdiles y Grondona,

[3] Ya que el número de componentes puros depende del de bandas espectrales, los sensores de mayor resolución espectral permitirán obtener un mayor número de componentes.

1995). Asimismo, resulta un aliado clave en los estudios de deforestación (Shimabukuro y Smith, 1991; Shimabukuro et al., 1994; Holben y Shimabukuro, 1993; Adams et al., 1995), para estudiar regeneración de especies vegetales (Hlavka y Spanner, 1995), densidad de cabida cubierta (Gong et al., 1994), y en el seguimiento y cartografía de áreas quemadas (Caetano et al., 1994).

En nuestro caso, hemos utilizado un programa para generar las fracciones sub-píxel incluido en el paquete XPACE (PCI, 1994), que incorpora un algoritmo de mínimos cuadrados. Los componentes puros que se delimitaron son el agua, vegetación y suelo, empleando las 6 bandas no térmicas de la imagen TM de Arganda. Estos componentes aparecen en la figura 7.19, que también incluye una imagen correspondiente al error medio cuadrático de la estimación realizada. El

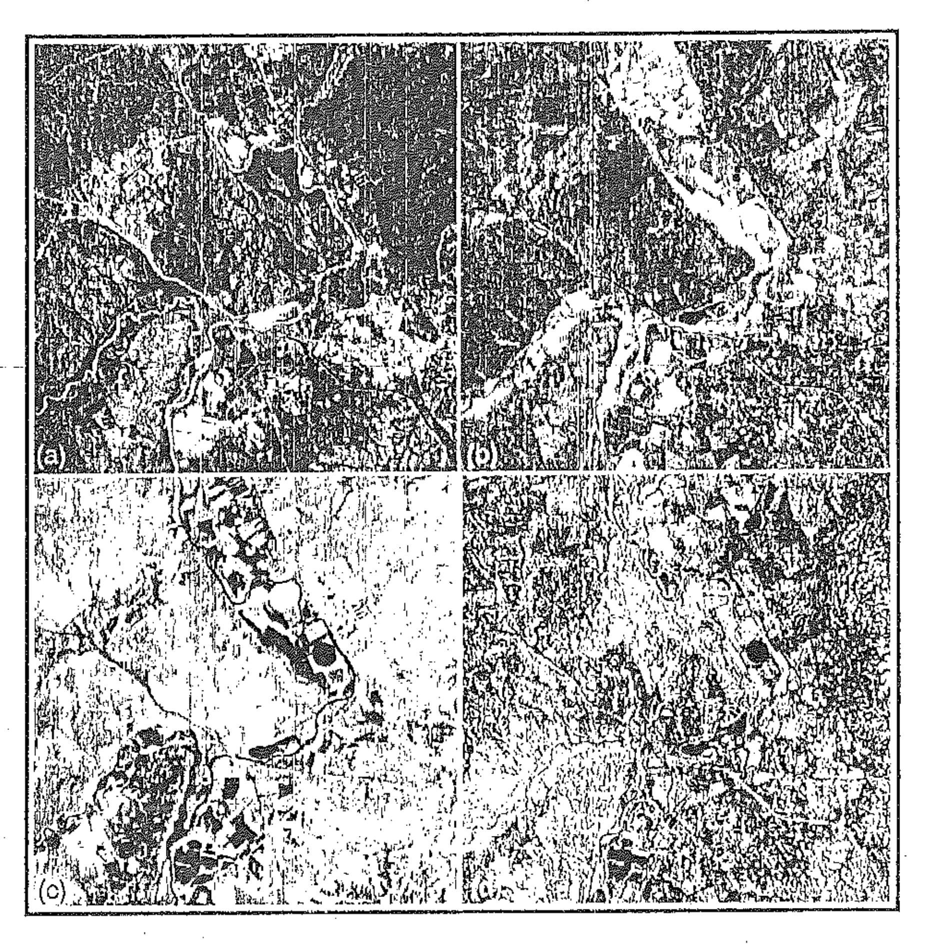


Fig. 7.19 - *Componentes puros de la imagen de Arganda: (a) Agua, (b) Vegetación, (c) Suelo, (d) Error medio cuadrático.*

comentario de estas imágenes sub-píxel resulta bastante análogo al que hemos realizado de los componentes principales y tasseled cap, ya que están reflejando las tres dimensiones de información incluidas en una imagen Landsat-TM. En este caso, cada componente tiene un sentido físico: la proporción de agua, vegetación o suelo que presenta, en un continuo desde la máxima cantidad (100 %) que aparece en las zonas donde se definió el miembro puro, hasta las que ofrecen una proporción prácticamente despreciable. El componente de agua presenta los valores más altos en las lagunas artificiales, generadas por extracción de grava, y en los cauces de los ríos. Asimismo, muestra valores altos para las zonas urbanas y el asfalto (N-III). El componente vegetación resulta evidente en los cultivos en regadío y árboles de ribera, y a mayor distancia en las urbanizaciones ajardinadas. El suelo ofrece los valores más altos para el cerro del Piul, una superficie yesífera bastante descubierta, y los más bajos para el agua y los cultivos regados, donde la vegetación cubre prácticamente el suelo. Finalmente, el componente de error es más alto en las superficies intermedias a varias cubiertas, siendo muy bajo en los cultivos de regadío y láminas de agua donde se señalaron los componentes puros.

7.2. Categorización de imágenes: clasificación digital

7.2.1. Introducción

Pese a la pujanza de las nuevas técnicas de análisis continuo, todavía para la mayor parte de los usuarios de la teledetección, la clasificación supone la fase culminante del tratamiento digital de imágenes. Hacia ella se orientan buena parte de los realces y correcciones previamente analizados, así como algunas transformaciones.

Como fruto de la clasificación digital se obtiene una cartografía e inventario de las categorías objeto de estudio. La imagen multibanda se convierte en otra imagen, del mismo tamaño y características de las originales, con la importante diferencia de que el ND que define cada píxel no tiene relación con la radiancia detectada por el sensor, sino que se trata de una etiqueta que identifica la categoría asignada a ese píxel. A partir de una imagen como ésta puede fácilmente generarse cartografía temática, así como un inventario estadístico del número de píxeles —y por tanto de la superficie— asignados a cada categoría (fig. 7.20).

La clasificación de la imagen se beneficia notablemente de algunos procesos de corrección y realce previamente estudiados. Sin embargo, conviene considerar que puede abordarse una clasificación exclusivamente a partir de los ND de la imagen, ya que las categorías temáticas suelen definirse de modo relativo a las condiciones específicas de la escena a clasificar. En otras palabras, la

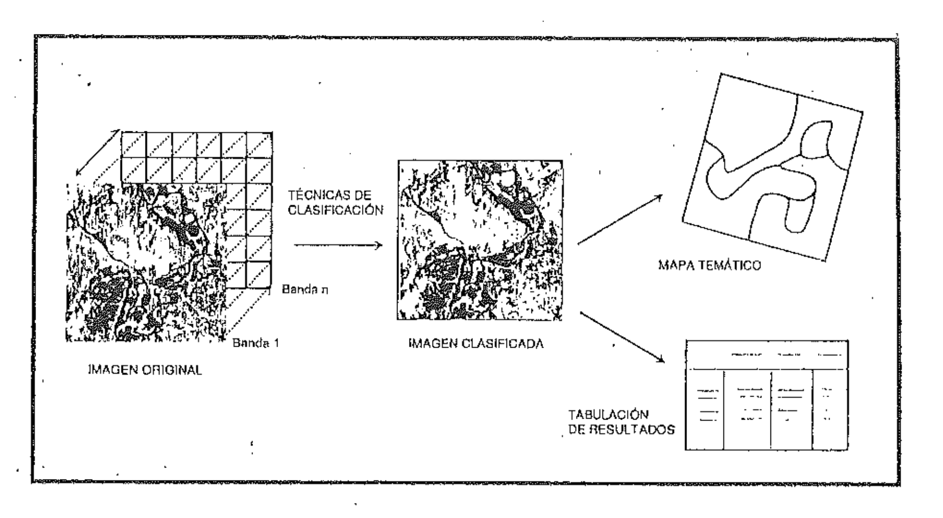


Fig. 7.20 - *Fundamentos de la clasificación digital*

clasificación digital no busca una definición absoluta de cada cubierta, que pudiera ser aplicable a cualquier imagen, sino más bien una caracterización relativa, válida para una determinada imagen y un territorio concreto (Robinove, 1981). Con este planteamiento, no resulta preciso conocer detalladamente las condiciones de adquisición: basta identificar en la imagen las clases a discriminar, sin pretender que esa identificación sea extrapolable a otras situaciones. En resumen, no se trata de establecer un modelo entre medidas digitales y parámetros físicos, sino entre medidas digitales, para un sensor, una zona y una fecha determinada, y tipos de cubierta. En este sentido, la clasificación supone un enfoque más cualitativo, si bien, por tratarse de un proceso numérico, incorpora un aparato estadístico ciertamente importante. Lógicamente esto supone el nivel de interpretación más elemental, aunque todo lo dicho en este capítulo también es aplicable al trabajo con valores calibrados de radiancia, reflectividad o temperatura.

Como ya hemos indicado, la clasificación digital implica categorizar una imagen multibanda. En términos estadísticos, esto supone reducir la escala de medida, de una variable continua (los ND originalmente detectados por el sensor) a una escala nominal o categórica. La apariencia externa puede resultar muy similar entre ambas variables, ya que presentan el mismo tamaño y pueden visualizarse en niveles de gris. Sin embargo, es importante considerar que no pueden aplicarse ciertas operaciones estadísticas a una imagen clasificada, ya que, pese a ser digital, no es una variable cuantitativa, sino cualitativa. Un sencillo ejemplo bastará para explicar este razonamiento. El objetivo de los filtros espaciales (ver 6.6.6) es asimilar o reforzar los contrastes en los ND de píxeles vecinos. Esto implica que el ND de un determinado píxel se obtiene mediante algún tipo de operación aritmética con los ND de los píxeles inmediatos, lo que implica una escala de medida continua. En una imagen clasificada, no puede realizarse ninguna operación de

este tipo, ya que la categoría 1 y la 2 no tienen relación numérica entre sí (1 no es mayor o menor que 2), y, en consecuencia, no tiene ningún sentido, por ejemplo, promediarlas. Por tanto, en imágenes clasificadas las operaciones espaciales entre píxeles vecinos deben basarse en parámetros estadísticos apropiados para variables nominales (la moda o el índice de variación cualitativa).

El ND de un píxel clasificado, en definitiva, es el identificador de la clase en donde se haya incluido. Estas clases pueden describir distintos tipos de cubierta (variable nominal o categórica), o bien intervalos de una misma categoría de interés (variable ordinal). Una clasificación de especies vegetales estaría dentro del primer grupo, mientras un intento de señalar niveles de afectación en un incendio forestal o de humedad en el suelo, en el segundo.

Los primeros ensayos de clasificación digital de imágenes de satélite se basaron exclusivamente en los ND que forman la imagen. Como ya sabemos, estos ND son una traducción digital de un flujo energético recibido por el sensor para una determinada banda del espectro. En consecuencia, una clasificación basada exclusivamente sobre ND puede denominarse propiamente clasificación espectral. Con ser muy rica esta información, no siempre es capaz de separar cubiertas, pues puede haber distintas categorías temáticas con un comportamiento espectral similar. En ese caso, se recomienda acudir a las otras dos dimensiones de información que contiene una imagen: la espacial y la temporal. En el primer caso, se trataría de incorporar a la clasificación el contexto espacial en el que aparece cada píxel. En el segundo, se aportarían datos sobre su evolución estacional, lo cual es especialmente crítico para la discriminación de cubiertas vegetales. Finalmente, puede ocurrir que ninguna de estas tres dimensiones sea suficiente para separar ciertas cubiertas, y sea preciso acudir a información auxiliar (topografía, suelos, etc.), lo que se facilita notablemente por la creciente conexión con los sistemas de información geográfica (ver cap. 9). A lo largo de este capítulo veremos algunos procedimientos para abordar estos enfoques alternativos, si bien nos centraremos principalmente en la interpretación de los datos espectrales.

Simplificando las cosas, la clasificación digital de imágenes sigue cauces análogos a los que se emplean en foto-interpretación. En esta técnica, en primer lugar el intérprete identifica el patrón visual asociado a cada cubierta, de acuerdo a una serie de criterios: tono, textura, forma, contexto, disposición, etc., tal y como aparecen en unos fotogramas tipo. Posteriormente, delimita sobre el resto de las fotografías las zonas que se corresponden con ese modelo previamente definido. En otras palabras, asigna a cada categoría unas determinadas superficies, en función de la semejanza de éstas con el patrón-tipo identificado previamente. Por último, verifica sobre el terreno la interpretación realizada.

Éste es también el esquema de la clasificación digital. Basta traducir los criterios analógicos por digitales, por cuanto se realiza sobre los ND presentes en

la imagen. De esta forma, pueden distinguirse las siguientes fases: (i) definición digital de las categorías (fase de entrenamiento), (ii) agrupación de los píxeles de la imagen en una de esas categorías (fase de asignación), y (iii) comprobación y verificación de resultados. Trataremos aquí de las dos primeras, reservando la tercera para un capítulo independiente, puesto que las técnicas de verificación son aplicables tanto al tratamiento digital como al análisis visual.

7.2.2. Fase de entrenamiento

7.2.2.1. Conceptos básicos

Para que una fotografía aérea pueda ser interpretada en detalle es preciso que exista una experiencia previa, que nos permita identificar cada una de las categorías de interés por una serie de rasgos, como son tono, textura, situación o tamaño. Es posible distinguir entre matorral y arbolado, gracias a que éste tiene una textura más rugosa; mientras la separación entre agua y cultivos herbáceos de secano se realiza sobre la diferencia de tonalidad. De la misma forma, la clasificación digital se inicia definiendo cada una de las categorías que pretenden discriminarse. Por cuanto se trata de una clasificación basada en los valores numéricos de los píxeles, esta definición también debe ser numérica; esto es, se trata de obtener el ND, o mejor aún el rango de ND, que identifica a cada categoría, para todas las bandas que intervienen en la clasificación.

Como ya hemos visto a lo largo de esta obra, diversos factores introducen una cierta dispersión en torno al comportamiento espectral medio de cada cubierta. Esto implica que las distintas categorías no se definen por un sólo ND, sino por un conjunto de ND, más o menos próximos entre sí. En términos de su clasificación digital, esto supone que existe una cierta dispersión en torno al ND medio de cada categoría, más o menos significativa según las clases que se consideren y la propia complejidad del paisaje donde éstas se asienten. Por ello, la fase de entrenamiento resulta ciertamente compleja: se trata de definir con rigor cada una de las categorías que pretendan discriminarse, teniendo en cuenta su propia variabilidad en la zona de estudio.

Este objetivo se logra seleccionando una muestra de píxeles de la imagen, que representen, adecuadamente, a las categorías de interés. A partir de esos píxeles pueden calcularse los ND medios y la variabilidad numérica de cada categoría, en todas las bandas que intervienen en la clasificación. Al igual que en cualquier otro muestreo, el objetivo de esta fase es obtener los resultados más precisos con el mínimo coste. En otras palabras, identificar debidamente las distintas categorías, reduciendo a lo imprescindible los trabajos de campo. Al igual que en otras aplicaciones del muestreo, las estimaciones posteriores se basan sobre la muestra seleccionada, por lo que una incorrecta selección de ésta conducirá inexorable-

mente a pobres resultados en la clasificación posterior. Varios autores han comprobado que los resultados de la clasificación, están mucho más influidos por la definición previa de las categorías, que por el criterio con el que éstas son posteriormente discriminadas (Hixson et al., 1980; Story y Campbell, 1986; Gong y Howarth, 1990b). En definitiva, la fase de entrenamiento constituye la columna vertebral de la clasificación numérica.

Tradicionalmente se han dividido los métodos de clasificación en dos grupos: supervisado y no supervisado, de acuerdo a la forma en que son obtenidas las estadísticas de entrenamiento. El método supervisado parte de un conocimiento previo del terreno, a partir del cual se seleccionan las muestras para cada una de las categorías. Por su parte, el método no supervisado procede a una búsqueda automática de grupos de valores homogéneos dentro de la imagen. Queda al usuario, en este caso, la labor de encontrar correspondencias entre esos grupos y sus categorías de interés. Volviendo al paralelismo con la fotointerpretación, podríamos afirmar que en ésta el método supervisado es el más habitual, por cuanto se identifican sobre unos fotogramas-tipo las características de cada clase, para luego delimitar, en el resto, las zonas que se ajustan a esas características. El método no supervisado supondría, en primer lugar, identificar sobre la fotografía aérea zonas homogéneas en cuanto a tonos, textura, disposición, etc., para luego asignarlas a una de las clases temáticas establecidas en la leyenda.

Para iluminar el sentido de ambos métodos, puede ser conveniente introducir una pequeña reflexión sobre el tipo de categorías que pueden intervenir en una clasificación temática. Suelen distinguirse, a este respecto, dos tipos de clases: informacionales y espectrales (Labrandero, 1978; Chuvieco, 1986). Las primeras son las que constituyen la leyenda de trabajo que pretende deducir el intérprete (tipos de ocupación del suelo, por ejemplo). Las segundas, corresponden a los grupos de valores espectrales homogéneos dentro de la imagen, en función de ofrecer una reflectividad similar, para las bandas consideradas y en la fecha concreta de la imagen. Las categorías informacionales se establecen por el usuario, mientras las espectrales se deducen de los ND presentes en la imagen.

Idealmente habría de producirse una correspondencia biunívoca entre las dos (fig. 7.21); esto es, que a cada clase de cobertura le corresponda un único grupo espectral, y que cada grupo espectral corresponda a una sola clase temática. Desgraciadamente este caso es muy poco frecuente, produciéndose, normalmente, alguna de las siguientes situaciones:

(i) Que una categoría de cubierta esté expresada en varias clases espectrales. Por ejemplo, el pinar según su emplazamiento podría aparecer en dos grupos: uno correspondiente a solana y otro a umbría; o el agua en distintos tipos, de acuerdo a su profundidad o turbidez. En estos casos, basta perfeccionar el muestreo,

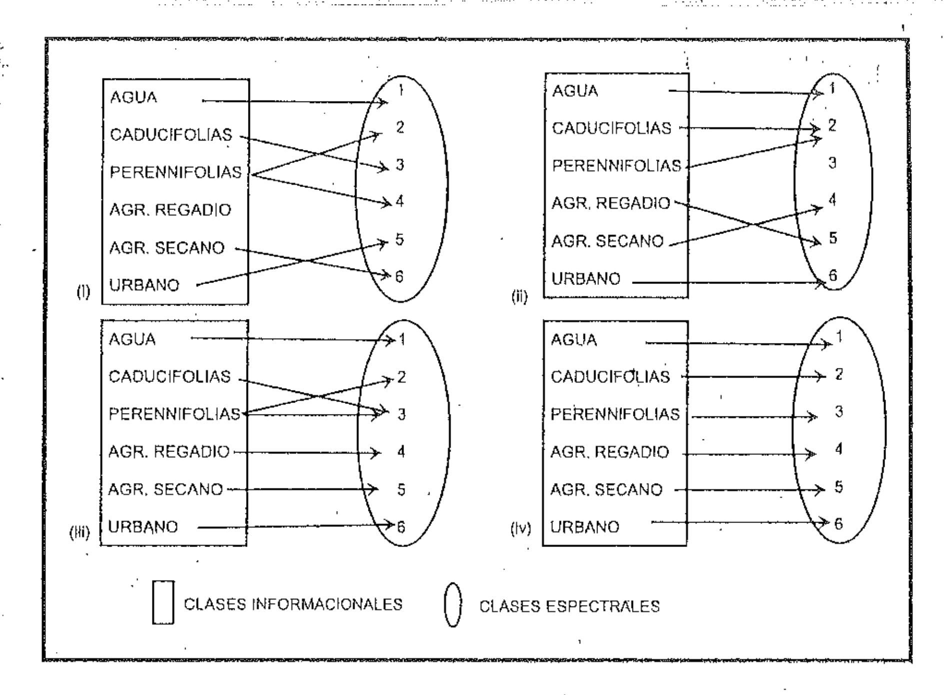


Fig. 7.21 - *Relaciones entre clases informacionales y espectrales: (i) una informacional-varias espectrales; (ii) una espectral-varias informacionales; (iii) mezcla de ambas; (iv) relación biunívoca entre ellas.*

de tal forma que se defina correctamente la dispersión espectral de cada clase. Si los grupos espectrales a que corresponden son muy variados, puede dividirse una categoría informacional en varias subclases, para luego fundirlas —tras la clasificación— en un sólo grupo. Esto evita contar con clases muy heterogéneas espectralmente, fácilmente sujetas por tanto a confusión con otras similares.

(ii) Otra cosa sería que dos o más categorías informacionales compartan una sola clase espectral. Esto implicaría que algunas categorías de la leyenda no son discriminables, a partir de la imagen con que se cuenta, sin grave peligro de confusión. En este caso, la opción más razonable sería optar por una clave más general, evitando descender a un nivel de desagregación no abordable a partir de esos datos. Por ejemplo, podría optarse por una clase denominada coníferas, en lugar de distinguir distintos tipos de pinar, o urbana, frente a distintas densidades de edificación. En caso de que las confusiones se den entre categorías no asimilables a una clave más genérica (por ejemplo, entre núcleos rurales y rastrojeras, en imágenes de verano: Chuvieco, 1985b), habría que analizar una imagen perteneciente a otra fecha del año en donde esa confusión sea evitable (mayo, en el ejemplo anterior). También pueden intentarse otros medios, como aplicar medidas de textura o situación espacial, o añadir alguna variable auxiliar (relieve, suelos, etc.).

(iii) Por último, puede también ocurrir que varias clases informacionales compartan clases espectrales. En este caso convendría replantear la estrategia de trabajo, o acudir a las soluciones parciales comentadas en párrafos anteriores.

A la luz de este comentario, parece claro que el método supervisado pretende definir clases informacionales, mientras el no supervisado tiende a identificar las clases espectrales presentes en la imagen. De los párrafos anteriores, también puede deducirse que ninguno de los dos métodos proporciona una solución inmediata a todos los problemas que entraña una clasificación digital. Por un lado, el método supervisado puede tacharse de subjetivo y artificial, pues puede 'forzarse' al ordenador a discriminar categorías que no tengan una claro significado espectral. Por otro, el método no supervisado proporciona en ocasiones resultados de difícil interpretación, poco conectados con las necesidades del usuario final del producto. Asimismo, resulta poco claro que este método sea realmente capaz de identificar las agrupaciones naturales de la imagen. De ahí la diversidad de algoritmos y de parámetros de control revisados en la literatura, como más tarde tendremos ocasión de analizar.

En resumen, la elección entre uno y otro método dependerá de los datos y medios disponibles y de las propias preferencias personales (Marx y Hildebrandt, 1978; Townshend y Justice, 1981).

7.2.2.2. *Método supervisado*

El método supervisado parte de un cierto conocimiento de la zona de estudio, adquirido por experiencia previa o por trabajos de campo. Esta mayor familiaridad con la zona de estudio, permite al intérprete delimitar sobre la imagen unas áreas suficientemente representativas de cada una de las categorías que componen la leyenda. Estas áreas se denominan, en la bibliografía anglosajona, *training fields* (áreas de entrenamiento). El término indica que tales áreas sirven para 'entrenar' al ordenador en el reconocimiento de las distintas categorías. En otras palabras, a partir de ellas el ordenador calcula los ND que definen cada una de las clases, para luego asignar el resto de los píxeles de la imagen a una de esas categorías en función de sus ND.

La mayor parte de los equipos de tratamiento digital permiten localizar interactivamente las áreas de entrenamiento. Con ayuda del digitizador o ratón electrónico, el usuario introduce sobre la pantalla los vértices que definen cada uno de estas áreas, asignándolas a una de las categorías definidas previamente en la leyenda. Los trabajos de campo y otros documentos auxiliares —como la fotografía aérea o la cartografía convencional— pueden ser de gran ayuda para una localización más precisa de estas áreas, teniendo en la mente que debe tratarse de ejemplos suficientemente representativos y homogéneos de la clase que pretende

definirse. Acabada la delimitación de una parcela de entrenamiento, pueden seleccionarse otras para la misma categoría, o bien culminar con ella la definición de esa clase. En general, resulta conveniente seleccionar varias áreas por categoría, a fin de reflejar adecuadamente su variabilidad en la zona de estudio.

Independientemente del método elegido para seleccionar las áreas de entrenamiento, conviene que exista un control de campo suficiente, en fecha próxima a la adquisición de la imagen, y mejor aún si es simultánea, para garantizar la consistencia entre lo medido en el terreno y por el sensor. En estos trabajos será muy interesante realizar algunas medidas radiométricas, aprovechando la creciente disponibilidad de radiómetros portátiles[4] (fig. 7.22), lo que permite interpretar con más rigor la señal recibida por el sensor o seleccionar las bandas más adecuadas para el tratamiento (Milton et al., 1995).

Finalizada la selección de las áreas de entrenamiento, el ordenador calcula las estadísticas elementales de cada categoría: media, rango, desviación típica, matriz de varianza-covarianza, etc., a partir de los ND de todos los píxeles incluidos

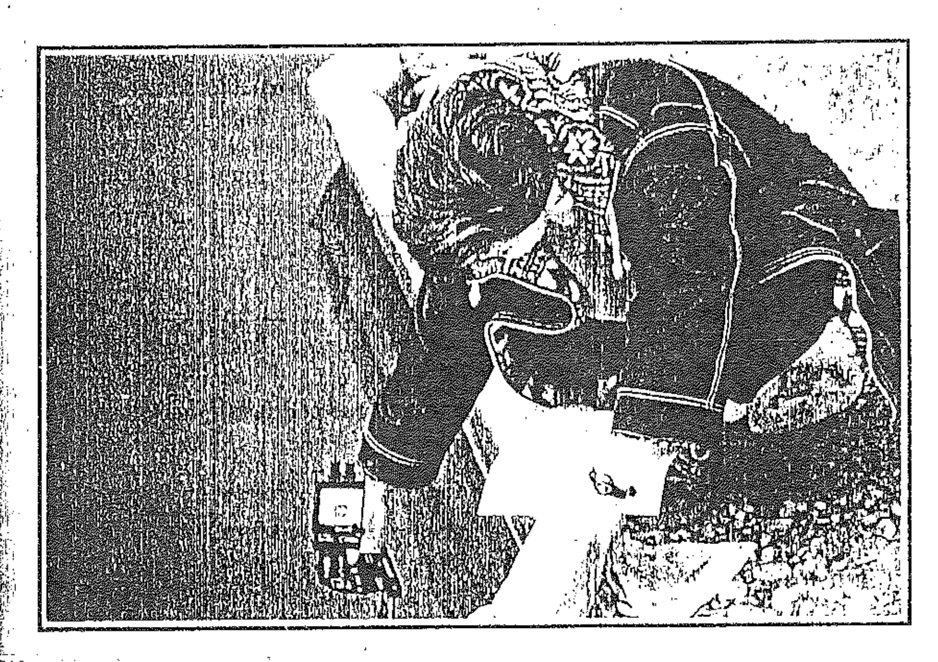


Fig. 7.22 - *El empleo de un radiómetro de campo permite verificar el comportamiento espectral de una cubierta, tal y como es observado por el sensor, así como estimar los efectos atmosféricos*

[4] En Milton et al. (1995) se incluye un análisis de los radiómetros de campo más convenientes para estudios de teledetección.

en las áreas de entrenamiento asignadas a esa clase. Lógicamente, este cálculo se aplica a todas las bandas que intervendrán en la clasificación. En definitiva, se asume que las áreas de entrenamiento son fieles representantes de las distintas categorías, y que, por tanto, las medidas extraídas a partir de sus ND definen convenientemente a esas clases. De aquí que sea crucial su correcta selección, ya que de otro modo se estaría forzando al ordenador a clasificar áreas heterogéneas. En consecuencia, la clasificación estaría viciada de partida, al pretender discriminar categorías con escaso significado espectral.

Un sencillo ejemplo puede servir para ilustrar el proceso de selección de las áreas de entrenamiento. Se trata de una imagen en la que aparecen sólo tres cubiertas: viñedo, encinar y cereal. Una primera opción sería localizar una parcela de entrenamiento por categoría (fig. 7.23), con el suficiente detalle para evitar confusiones con otras cubiertas. A partir de los vértices trazados previamente, el ordenador contabiliza los ND de todos los píxeles incluidos en cada área, y obtiene la media y desviación típica de las categorías que tratan de definir.

Ahora bien, la selección de áreas de entrenamiento sería incorrecta si alguna se situara en zonas de transición entre cubiertas. Al tratarse de un área heterogénea, sus medidas estadísticas serían un cierto promedio de los distintos componentes. Se trataría de una clase híbrida y, en consecuencia, susceptible de confusión con otras categorías.

El error contrario sería seleccionar únicamente áreas de entrenamiento en aquellos parajes donde la categoría sea muy homogénea, obviando la variación real que esa cubierta tenga en la imagen. Por ejemplo, si se pretende clasificar el encinar, conviene seleccionar áreas tanto donde el encinar aparece más denso, como en aquellas zonas en donde cubre menos el suelo, o donde se asocia con el matorral. No quiere esto decir que ambos tipos de encinar deban incluirse en la misma categoría de cara a la clasificación, puesto que podría originarse una clase

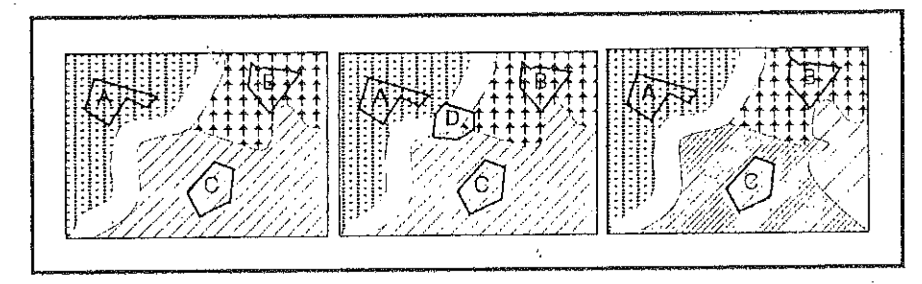


Fig. 7.23 - *Problemas en la selección de las áreas de entrenamiento. De izquierda a derecha: áreas homogéneas, áreas heterogéneas, categorías heterogéneas.*

poco coherente. Parece más recomendable establecer dos o más categorías (con distintos tipos de densidad), para luego proceder, tras la clasificación, a unirlas en una sola clase temática. De estas frases se deduce que el método supervisado requiere un previo conocimiento de las características del área de estudio, así como de las categorías que pretenden discriminarse.

Un último aspecto a considerar en la selección de las áreas de entrenamiento se refiere a los requisitos estadísticos que garantizan el grado de representatividad de las distintas categorías. Como antes se comentó, este proceso implica es una forma peculiar de muestreo espacial. Por ello, conviene tener en cuenta algunos criterios habituales en este tipo de técnicas para elegir el tamaño y la distribución más idónea de la muestra, así como para realizar estimaciones a partir de ella.

En cuanto al tamaño, se requiere seleccionar un mínimo de $m+1$ píxeles por categoría, siendo m el número de bandas que integran el análisis (Schowengerdt, 1983). Conviene, no obstante, superar con creces este límite mínimo. Diversos autores recomiendan seleccionar un número de píxeles comprendido entre $10m$ y $100m$ por categoría (Jensen, 1996; Mather, 1987). Este número mínimo se relaciona estrechamente con el grado de asociación espacial entre los ND de la imagen. El muestreo convencional considera que las muestras seleccionadas son aleatorias e independientes. Como antes indicamos, esta asunción no es válida en nuestro caso, por cuanto una parcela de entrenamiento alberga a píxeles vecinos, afectados por el fenómeno de la auto-correlación espacial. En pocas palabras, esta asociación, comprobada en diversos trabajos (Congalton, 1988a), supone que la información original extraída de un número de píxeles contiguos es menor que si fue obtenida a partir de otros dispersos. En suma, resulta más conveniente elegir varios campos de pequeño tamaño que uno sólo de mayores dimensiones, ya que tenderá a infravalorarse la variabilidad de esa categoría. También se puede optar por seleccionar píxeles aleatoriamente, dentro de campos de mayor tamaño, en lugar de admitirlos todos (Campbell, 1987). Otros autores recomiendan seleccionar píxeles aislados de cada categoría, en número suficiente para estimar adecuadamente la variabilidad espectral de dicha clase (Gong y Howarth, 1990a). Este criterio puede ser recomendable cuando existe suficiente control del terreno. En zonas de difícil acceso resulta poco operativo.

Otra alternativa a la selección de áreas de entrenamiento es señalar píxeles puros, en torno a los cuales se crea una parcela de modo automático. El criterio para incluir píxeles en ese área de entrenamiento puede basarse en un factor de similitud espectral o de distancia (o ambas) con el inicialmente seleccionado. Puede indicarse también la dirección en la que serán agregados nuevos píxeles, lo que resulta muy conveniente en clases de forma alargada (vegetación riparia). Este método garantiza que las áreas de entrenamiento sean suficientemente homogéneas, evitando incluir píxeles fronterizos a dos categorías que implicarían un aumento artificial de la varianza (Buchheim y Lillesand, 1989).

Respecto a la distribución, conviene tener en cuenta las propias características de la imagen, intentando abarcar las variaciones espaciales que se presentan en cada categoría: su orientación, pendiente, densidad, vigor, contenido de humedad, tipo de suelo, etc. En este sentido, varios autores han subrayado que la variabilidad de una cubierta es directamente proporcional a la resolución del sensor (Cushnie, 1987). Dicho de otro modo, cuanto mayor sea el detalle espacial registrado en la imagen, mayor será también su sensibilidad para detectar las variaciones internas de una categoría, ocultas de otra forma bajo un píxel de mayor tamaño. Por cuanto a mayor heterogeneidad, mayor mezcla con clases similares —y, en última instancia, mayor riesgo de confusiones en la asignación posterior—, un incremento en la resolución espacial puede complicar la clasificación digital. Este hecho, que parece contradecir el sentido común (mayor resolución espacial, mayor precisión), ha sido puesto de manifiesto por diversos autores, que lo denominan *'scene noise'*, ruido de la escena (Markham y Townshend, 1981). El efecto se ha comprobado con más nitidez en los tipos de cubierta más heterogéneos, como es el caso de las áreas urbanas, en donde un píxel de mayor tamaño facilita adquirir una señal promedio de distintos componentes, mientras cuanto más se reduzca el píxel, los efectos de frontera son más intensos (Toll, 1984). Por el contrario, en categorías agrícolas y forestales, ese efecto es menos nítido, siendo más convenientes las imágenes de alta resolución (Irons y Kennard, 1986; Hopkins et al., 1988).

La delimitación de las áreas de entrenamiento sobre la imagen de Arganda se realizó, en nuestro caso, acudiendo a la fotografía aérea y los trabajos de campo. Se delimitaron 21 áreas, correspondientes a 8 categorías temáticas: láminas de agua, cultivos de regadío, suelo descubierto, pastizales, matorrales, pinar, superficie urbana densa y superficie urbana ajardinada. Se pretendía ensayar la aplicación de este método supervisado a la clasificación del conjunto de la imagen, comparando los resultados con los ofrecidos por el método no supervisado. A lo largo de este capítulo, iremos comentando el proceso seguido en ambos casos.

7.2.2.3. Método no supervisado

Este método se dirige a definir las clases espectrales presentes en la imagen. No implica ningún conocimiento del área de estudio, por lo que la intervención humana se centra más en la interpretación que en la consecución de los resultados.

En esta estrategia, se asume que los ND de la imagen forman una serie de agrupaciones o conglomerados (*clusters*), más o menos nítidos según los casos. Estos grupos equivaldrían a píxeles con un comportamiento espectral homogéneo y, por tanto, deberían definir clases temáticas de interés. Desgraciadamente, como se vio más arriba, estas categorías espectrales no siempre pueden equipararse a

las clases informacionales que el usuario pretende deducir, por lo que resta a éste interpretar el significado temático de esas categorías espectrales.

El método para definir los agrupamientos espectrales es muy similar al empleado en otras técnicas de clasificación automática de datos (Johnston, 1978; Hand, 1981). Se basa en la selección de tres parámetros: (i) variables que intervienen en el análisis; (ii) criterio para medir la similitud o distancia entre casos, y (iii) criterio para agrupar los casos similares.

En nuestro contexto, las variables son las bandas espectrales seleccionadas para la clasificación, ya sean éstas originales o fruto de alguna transformación. Los casos son los píxeles que componen la imagen, cada uno de ellos definido por tantos ND como bandas intervienen en el análisis. En este espacio multivariado se trata de encontrar los grupos de píxeles con ND similares, para luego equipararlos con alguna de las clases informacionales de nuestra leyenda.

El método para encontrar esos grupos homogéneos puede ilustrarse con el caso más simple, en el que estuviéramos trabajando con dos bandas (infrarrojo cercano y rojo, por ejemplo). En un gráfico bivariado aparecerían tantos puntos como píxeles, localizados de acuerdo a sus ND en cada banda (fig. 7.24). El gráfico evidencia la existencia de agrupaciones de píxeles, con ND similares en las

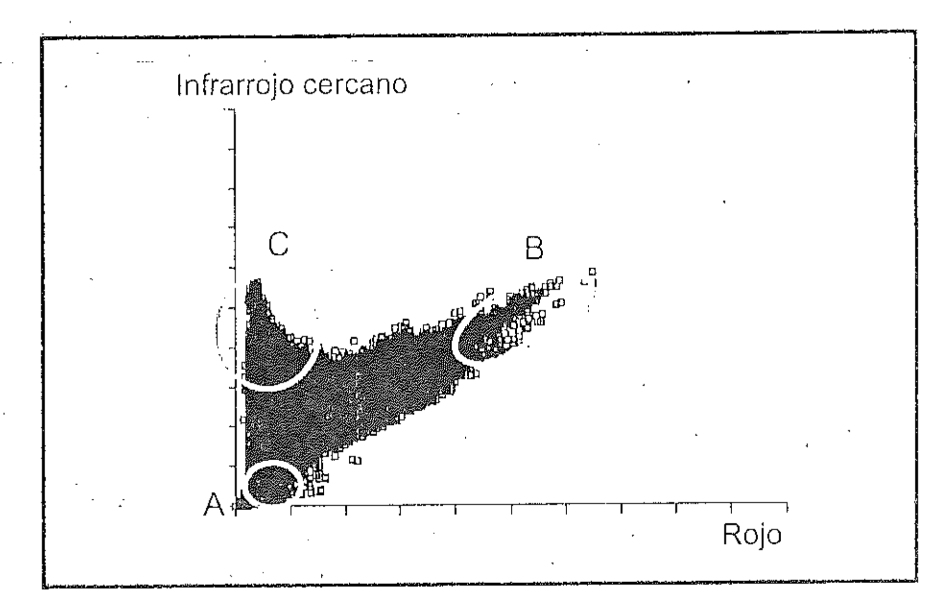


Fig. 7.24 - *Fundamentos del análisis no supervisado. La distribución de los ND en la imagen implica que existen algunas agrupaciones de píxeles, que se corresponden con las coberturas de interés.*

dos bandas, que podrían identificar clases temáticas de interés. Por ejemplo, los puntos situados en el vértice inferior izquierdo corresponderían a píxeles con ND bajos en las dos bandas (A), los situados en el superior derecho serían píxeles con altos valores en ambas bandas (B), mientras los correspondientes al extremo superior izquierdo implican ND bajos en la banda Roja y altos en el Infrarrojo cercano. En estas regiones del espectro, podríamos identificar estos grupos como pertenecientes a agua, suelos desnudos o vegetación, respectivamente, aunque en esta fase sólo nos interesa conocer que se trata de grupos homogéneos.

La delimitación de cada grupo espectral se inicia señalando dos criterios: uno que mida la similitud entre píxeles, y otro que marque las condiciones del proceso de agrupamiento. En cuanto al primer aspecto, se han propuesto diversos criterios para medir la distancia entre píxeles. El más utilizado se basa en la distancia euclidiana:

$$d_{a,b} = \sqrt{\Sigma_{i=1,m}(ND_{a,i} - ND_{b,i})^2} \qquad [7.42]$$

donde $d_{a,b}$, indica la distancia entre dos píxeles cualquiera a y b; $ND_{a,i}$ y $ND_{b,i}$, los niveles digitales de esos píxeles en la banda i, y m el número de bandas. También pueden utilizarse otros criterios para medir la distancia entre píxeles, como sería el caso de la distancia media o la de Mahalanobis (Rebollo y Orti, 1980), si bien la distancia euclidiana resulta la más habitual en este tipo de aplicaciones.

En cuanto al algoritmo de agrupamiento, las opciones también son muy numerosas. Uno de los más extendidos es el denominado ISODATA (Duda y Hart, 1973). En esencia, este algoritmo procede a partir de las siguientes fases (fig. 7.25):

(i) se señalan una serie de centros de clase, de acuerdo al número y forma indicados por el usuario;

(ii) se asignan todos los píxeles de la imagen al centro de clase más próximo;

(iii) se calculan de nuevo los centros de clase, teniendo en cuenta los valores de todos los píxeles que se le hayan incorporado en la fase anterior;

(iv) se re-ordenan los centros de clase en función de los parámetros de control indicados por el usuario (distancia mínima entre grupos, tamaño mínimo de un grupo, varianza máxima de un grupo y número de grupos);

(v) se vuelven a asignar todos los píxeles de la imagen al centro más cercano, el cual —debido al desplazamiento registrado en (iii)— no tiene por qué coincidir con la asignación realizada en (ii);

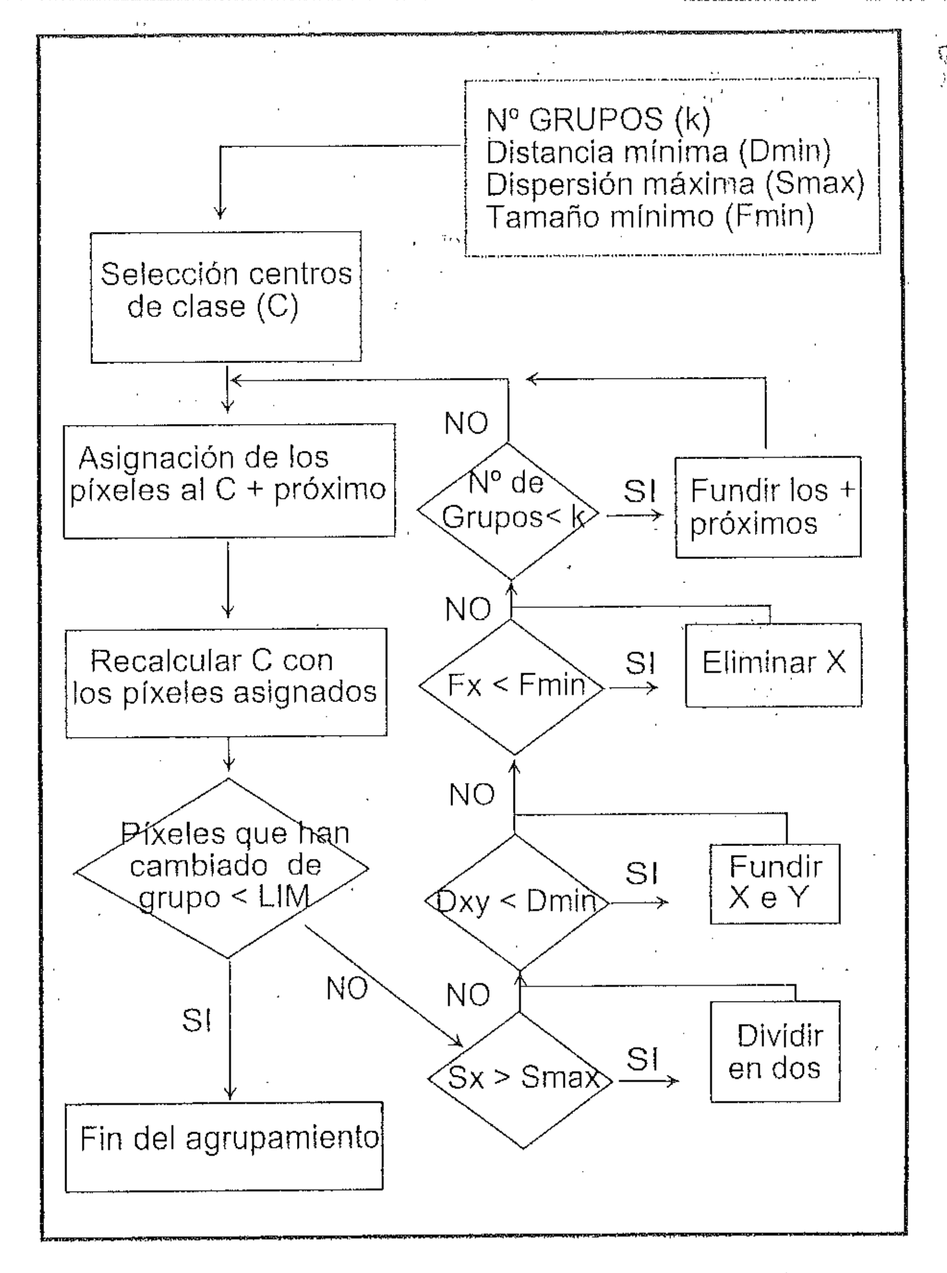


Fig. 7.25 - *Esquema del criterio de clasificación ISODATA*

(vi) si el número de píxeles que han cambiado de categoría es inferior al señalado por el usuario se termina el proceso; en caso contrario, se retorna a la fase (iii).

El punto más crítico de este algoritmo es la decisión sobre los parámetros de control más convenientes (los indicados en iv). En cada iteración el ordenador se pregunta: ¿se ha alcanzado el número máximo de grupos para interrumpir el agrupamiento?, ¿algún grupo tiene un número de píxeles inferior al mínimo señalado, en cuyo caso se suprime?, ¿algún grupo está a una distancia inferior a la mínima señalada entre grupos para realizar una fusión?, ¿algún grupo cuenta con una varianza superior a la máxima señalada para que sea dividido?

Desde el punto de vista estadístico, este algoritmo parece bastante adecuado para delimitar los grupos de valores homogéneos dentro de la imagen (Rebollo y Ortí, 1980). Sin embargo, en ocasiones resulta artificioso señalar unos parámetros de control significativos, puesto que el usuario no conoce, de partida, el número de grupos espectrales presentes en la imagen, ni el valor idóneo de dispersión interna o de distancia entre grupos. De esta forma, el análisis no supervisado se convierte en un proceso iterativo, en donde el usuario establece unos valores arbitrarios que se van modificando a la vista de los resultados.

Otra dificultad del método no supervisado es el gran volumen de cálculo que precisa. De acuerdo a las estimaciones de Richards (1993), a partir de la quinta iteración, los cálculos necesarios son mayores que para la clasificación de máxima verosimilitud (ver 7.2.3.3), el método más tedioso, aunque también el más preciso, de asignación. Habitualmente, un buen agrupamiento se consigue tras un número mucho mayor de iteraciones, por lo que este criterio resulta muy lento para clasificar el conjunto de la imagen. Parece más razonable, en consecuencia, extraer una muestra sistemática de píxeles (1 de cada 4, 8 ó 16, por ejemplo) para calcular sobre ellos los centros de clase, que luego se clasifiquen con alguno de los criterios de asignación que veremos en el siguiente epígrafe. En este caso, no se clasifica la imagen completa, pero sí pueden identificarse los grupos presentes en ella, objetivo último del método no supervisado.

En definitiva, aunque un grupo de autores considera el método no supervisado como una forma específica de clasificación —esto es, como una estrategia completa, que abarca tanto la fase de entrenamiento como la asignación de los píxeles de la imagen a las categorías de la leyenda—, a nuestro juicio supone más bien una forma alternativa de obtener las estadísticas de entrenamiento. En otras palabras, el análisis no supervisado se orienta no tanto a la clasificación de la imagen, como a definir precisamente los grupos o categorías que intervendrán en la clasificación propiamente dicha. En este sentido, el método no supervisado podría considerarse como exploratorio (Mather, 1987), dirigido a deducir las clases espectrales presentes en la imagen. Eso es especialmente importante cuando se adoptan criterios de clasificación que asumen una distribución normal de los datos. El análisis no supervisado podría indicarnos si efectivamente esas clases informacionales tienen un sentido espectral claro o, por el contrario, algunas clases informacionales presentan una

distribución bimodal o multimodal (o, lo que es lo mismo, se presentan en varias categorías espectrales).

Como en el caso del método supervisado, es necesario analizar los píxeles incluidos en cada grupo para obtener sus medidas estadísticas elementales: media, desviación típica, mínimo, máximo, etc., que servirán para abordar la fase posterior de clasificación.

En el caso de la imagen de Arganda, el análisis no supervisado se realizó sobre las 6 bandas no térmicas del sensor, extrayendo una muestra de 1 de cada 8 líneas y columnas. El programa utilizado para este análisis se inicia señalando aleatoriamente unos ND correspondientes a los centros de clase iniciales para el agrupamiento, tantos como haya indicado el usuario. A partir de ahí va desplazando estos centros de clase hasta que se alcanza un número de cambios de grupo inferior al indicado o se termina el número máximo de iteraciones. En nuestro caso, se señalaron como parámetros de control los siguientes: 20 iteraciones, entre 12 y 20 grupos, 5 como umbral de tamaño mínimo de cada grupo, 2 desviaciones típicas como dispersión máxima en un grupo para dividirlo, y 1 como distancia mínima entre grupos para que fueran unidos. Con este esquema se generaron 19 clases temáticas, que fueron comparadas con las estadísticas generadas del proceso supervisado para proceder al agrupamiento.

7.2.2.4. *Métodos mixtos*

Como ya apuntamos, tanto el método supervisado como el no supervisado cuentan con ventajas e inconvenientes (Hoffer y Swain, 1980; Justice y Townshend, 1981). El primero resulta muchas veces subjetivo, pues el usuario establece *a priori* unas categorías sin valorar las características espectrales de la imagen. El segundo, no garantiza que las clases deducidas tengan significado para el usuario del producto, además de ser de difícil verificación.

Con objeto de paliar los inconvenientes de ambos métodos, se han propuesto diversas alternativas que los combinan de alguna forma. Estos métodos mixtos pueden agruparse en dos bloques:

(i) Por un lado, se sitúan aquellos trabajos que emplean el análisis supervisado para 'guiar' al no supervisado. En este caso, el conocimiento del intérprete se utiliza para orientar la búsqueda de esos grupos espectrales homogéneos. Por ejemplo, puede aplicarse el método no supervisado a áreas de la imagen con una cobertura conocida, lo que facilitaría la definición espectral de dicha cubierta (Justice y Townshend, 1981; Lachowski y Dietrich, 1978; Hoffer y Fleming, 1978). Otra forma de orientar el análisis no supervisado, consiste en introducir los ND medios de las categorías de interés —obtenidas a partir de las áreas de entrenamiento—

como centros iniciales de grupo. Gracias a ello, el proceso iterativo de búsqueda se reduce notablemente, a la vez que se predispone la formación de grupos con un significado temático.

(ii) Por otro lado, el análisis supervisado y el no supervisado pueden combinarse gracias a aplicarlos separadamente sobre la misma imagen, para luego sintetizar las medidas extraídas por ambos. Se asume que las categorías deducidas por los dos métodos pueden complementarse mutuamente, ganando en significado espectral e informacional las clases resultantes. Algunos autores, por ejemplo, emplean el análisis no supervisado para estratificar la imagen, quedando el supervisado para las áreas no clasificadas previamente (Bruneau y Gautier, 1981; Núñez et al., 1983). Más original resulta combinar categorías deducidas por los dos métodos, empleando un algoritmo de agrupación jerárquico. Esto permite crear un nuevo conjunto de categorías en donde se combina la información obtenida por ambos métodos (Chuvieco y Congalton, 1988a). En breves palabras, se trata de clasificar conjuntamente las categorías deducidas por el análisis supervisado y no supervisado sobre la misma imagen (fig. 7.26). Esta clasificación conjunta permite obtener tres tipos de grupos: unos formados por categorías supervisadas y no supervisadas; otros, sólo por categorías supervisadas, y un tercero, sólo por categorías no supervisadas. El primer grupo identifica aquellas clases seleccionadas por el intérprete que cuentan con un significado espectral claro. El segundo corresponde a clases informacionales con escaso significado espectral. Éstas, al menos *a priori*, resultarán de difícil asignación, ya que no se identifican con agrupaciones naturales de la imagen. Por último, el tercer grupo se refiere a clases espectrales no asimilables a la leyenda propuesta por el usuario. A partir del análisis de estos dos últimos grupos, el intérprete puede refinar el esquema de clasificación propuesto inicialmente.

7.2.2.5. *Análisis de las estadísticas de entrenamiento*

Independientemente del método empleado en definir la fase de entrenamiento, antes de abordar el proceso de clasificación propiamente dicho, conviene reflexionar sobre la discriminabilidad de las categorías seleccionadas. En otras palabras, es preciso evaluar la viabilidad de que esas categorías puedan clasificarse sin grave riesgo de error. Si se comprueba que dos o más son muy similares, habría una gran probabilidad de confusión entre ellas, por lo que resultaría aconsejable: (i) confirmar que las estadísticas de entrenamiento han sido correctamente deducidas; (ii) adoptar una leyenda más general, con nuevas categorías que supongan una mezcla de las que ofrecen mayor riesgo de confusión; (iii) recabar información auxiliar o imágenes de otras fechas.

Existen varios métodos —tanto gráficos como numéricos— para evaluar las estadísticas de entrenamiento. Entre los gráficos, el más elemental es un diagra-

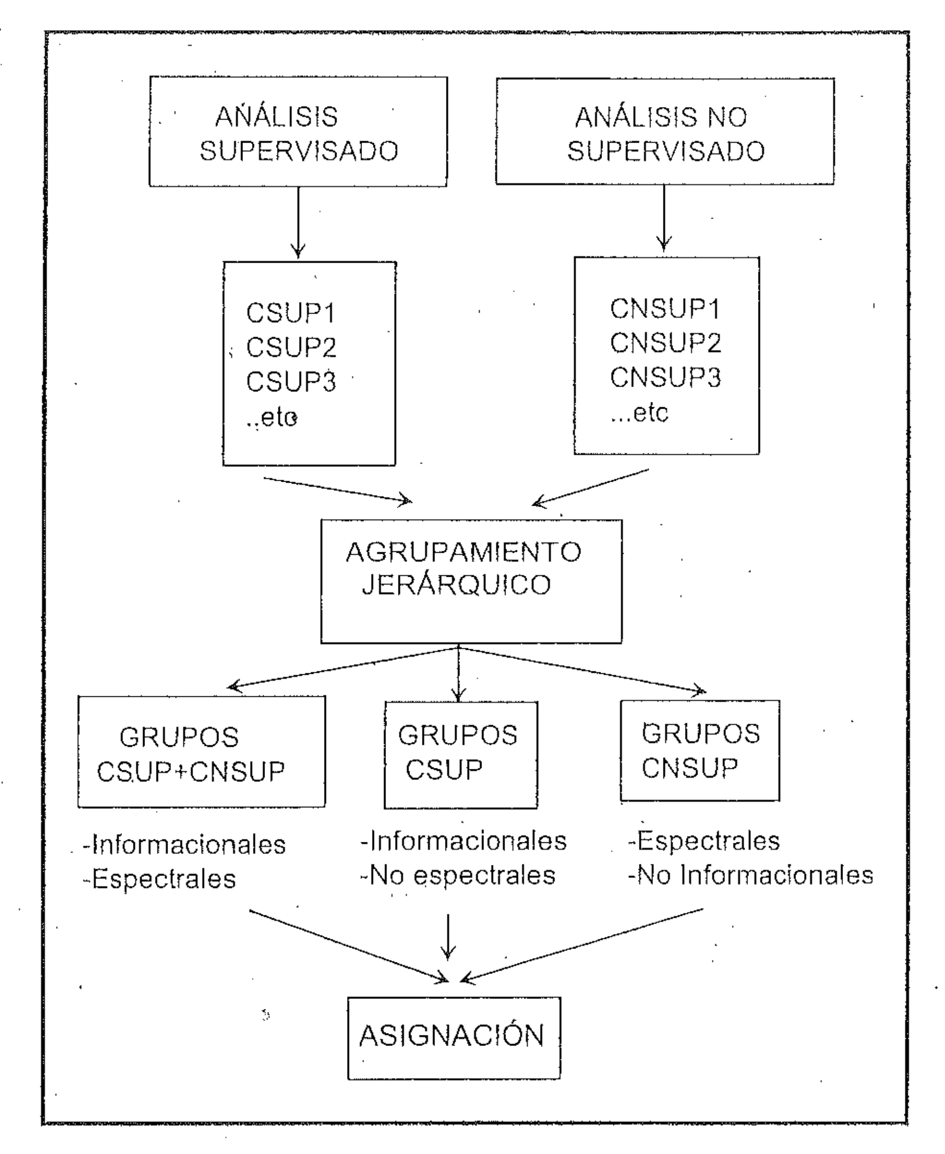


Fig. 7.26 - *Esquema de un algoritmo mixto. Las clases obtenidas mediante análisis supervisado y no supervisado se funden en un criterio de clasificación jerárquica, con objeto de realizar diversas clases y detectar anomalías en el entrenamiento supervisado.*

ma de signaturas, donde figuran, en abcisas, las bandas que intervienen en el análisis, mientras en ordenadas los ND medios de cada categoría. Conviene no confundir este gráfico con las curvas espectrales presentadas en el capítulo 2. Por un lado, aquí no se incluyen valores de reflectividad, sino ND. Por otro, la señal

recogida por el sensor corresponde a la anchura completa de la banda, y no sólo a su centro. Con estas salvedades, este gráfico resulta muy útil para proporcionar una primera valoración de las tendencias espectrales de cada categoría. Identifica, además, aquellas bandas en las que manifiesta un comportamiento peculiar respecto a clases vecinas. Las líneas paralelas y próximas indican un probable solape entre categorías, mientras las intersecciones entre líneas manifiestan las bandas donde es más probable separar a las categorías que representan.

En el caso de la imagen de Arganda, la tabla 7.5 recoge las medidas estadísticas elementales de las áreas de entrenamiento previamente seleccionadas. El valor medio nos informa del comportamiento espectral modélico, mientras la desviación típica refiere al grado de homogeneidad que aparece en torno a ese valor central. Los valores más altos de desviación típica corresponden a las categorías urbanas, como consecuencia del complejo entramado espacial que las constituyen. Tejados, vías de comunicación, lugares de recreo o espacios verdes pueden convivir en un mismo sector, haciendo muy complicada cualquier caracterización estadística. Entre las dos categorías urbanas, la más heterogénea corresponde al municipio de Arganda, como consecuencia de ser una zona de cobertura bastante diversa, con viales de distinta anchura. También la categoría residencial (urbano ajardinado) posee una alta desviación típica, especialmente en la banda 5, como consecuencia de su heterogeneidad espacial. Este comportamiento dificulta la clasificación digital de estas superficies, ya que ofrecen solapes con cubiertas naturales, ya sea suelos desnudos (edificación poco densa), ya con vegetación vigorosa (edificación residencial con espacios verdes). A continuación tendremos oportunidad de estudiar, con más detalle, estos problemas.

A partir de estos parámetros, puede construirse el gráfico de signaturas (fig. 7.27), tal y como se describió más arriba. Se aprecia ya una primera valoración de los rasgos espectrales de cada tipo de cobertura. El agua ofrece el comportamiento más peculiar, con valores inferiores según se avanza hacia el infrarrojo medio. Los cultivos regados también ofrecen una clara diversidad, al

Banda	Agua		Regadío		Suelo		Pastizal		Matorral		Pinar		Urbano		Residencial	
	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
1	77,63	1,92	77,79	1,83	164,52	11,63	106,04	5,97	95,72	5,41	78,49	3,29	142,23	22,74	104,79	5,38
2	36,47	0,74	35,67	1,61	90,26	7.35	53,32	5,49	44,88	3,65	34,26	1,79	73,43	13,54	50,84	3,58
3	32,21	0,94	32,75	2,37	115,67	11.12	67,70	8,72	53,11	5,03	35,12	2,91	90,66	16,40	59,97	5,65
4	22,51	1,58	122,79	21,98	113,24	10,28	69,32	9,90	60,06	5,70	52,03	2,90	78,65	11,56	74,68	6,28
5	13,48	1,63	61,67	7,51	210,17	17,86	139,32	7,27	109,68	11,62	59,07	8,45	125,69	12,23	92,50	11,27
6	6,60	1,14	18,38	4,19	115,70	10,33	70,86	4,25	54,19	6.89	24,14	4,51	81,51	9,91	46,99	6,54

Tabla 7.5 - *Media y desviación típica de las categorías seleccionadas*

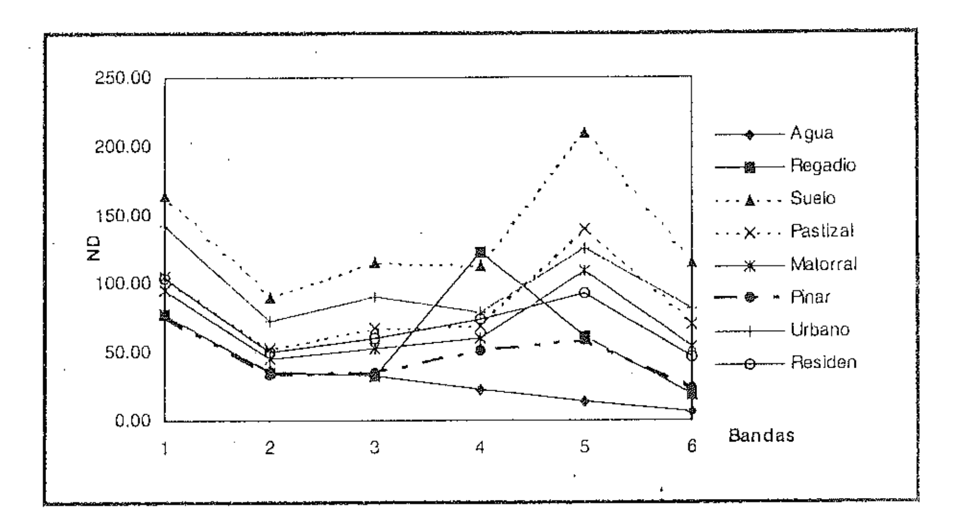


Fig. 7.27 - *Diagrama de signaturas espectrales para las cubiertas que intervienen en la clasificación*

ser grande su contraste entre las bandas 4 y 3-5. Los suelos descubiertos presentan un ND alto en todas las bandas, siendo más prominente en la 5, mientras las superficies urbanas muestran solapes con pastizales y matorrales.

Desgraciadamente la realidad es más compleja de lo que ofrece este gráfico, puesto que aquí sólo se refleja la tendencia media, sin considerar la variación propia de cada categoría, principal responsable de las confusiones con otras clases vecinas. Una idea más clara de estos solapes, puede obtenerse a partir de un gráfico de dispersión espectral. Se trata de un diagrama de barras que recoge, en cada banda y para cada categoría, el rango digital cubierto por la media ± una o dos desviaciones típicas. En el caso de la figura 7.28, hemos recogido los solapes entre tres bandas bastante contrastadas (1, 4 y 5). Observamos cómo ciertas cubiertas muestran solapes acentuados en algunas bandas (p.ej., el agua y los cultivos regados en la banda 1), pero se separan nítidamente en otras (en la 4, especialmente), mientras otras manifiestan una mayor similitud en todas ellas (pastizal-matorral), y el suelo se discrimina con claridad del resto en esas tres bandas.

Otra forma de representar los solapes entre categorías, consiste en realizar un histograma de frecuencias de los ND que la componen. Por cuanto aquí sólo se cuenta con una muestra y no el total de estos ND, una alternativa para representar esta distribución de frecuencias parte de asumir que los ND en el seno de cada categoría se distribuyen normalmente. Esto permite estimar su distribución, a partir de conocer su media y desviación típica. De esta forma, se construye la figura 7.29, que ofrece otra visión de los problemas de superposición entre

Fig. 7.28 - *Diagrama de confusión espectral entre cubiertas*

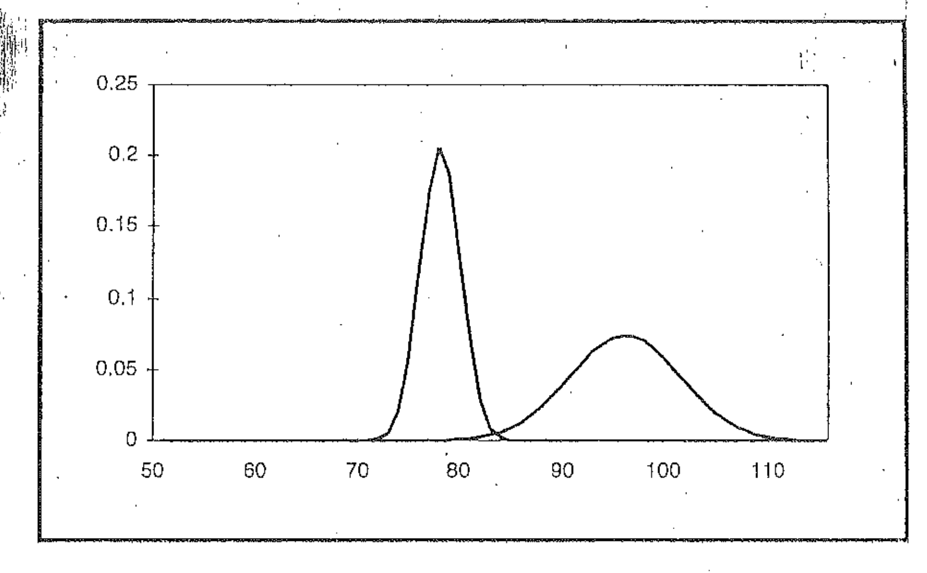


Fig. 7.29 - *Representación de las clases como distribuciones normales. En el gráfico se recoge la probabilidad de que aparezca un determinado ND en las clases agua (a la izquierda) y matorral (derecha) en la banda 1. Se observa la localización del ND medio de cada categoría, mientras la anchura de la curva de probabilidad está definida por la desviación típica (ver tabla 7.5).*

clases, en este caso para las categorías agua y cultivos regados. El solape entre ellas viene definido por los valores de la media (localización central de la curva) y desviación típica (anchura). Lógicamente, cuanto mayor sea ese solape entre categorías, más probable también la confusión al intentar discriminarlas, por lo que este tipo de gráficos nos ofrecen una primera valoración del error previsible en la clasificación.

Además de los procedimientos gráficos, existen algunos criterios cuantitativos que permiten evaluar numéricamente la posibilidad de discriminar las distintas categorías. El más sencillo consiste en calcular la distancia normalizada entre categorías (dn) (Swain y Davis, 1978):

$$dn_{A,B} = \frac{\left|\overline{ND_A} - \overline{ND_B}\right|}{s_A + s_B} \qquad [7.43]$$

calculada como la diferencia absoluta entre las medias de dos categorías (A y B), entre la suma de sus desviaciones típicas. Este cálculo se aplica a cada par de bandas que intervienen en la clasificación, promediándose su valor para obtener una matriz de separabilidad.

Un poco más compleja, y también más versátil, es la divergencia estadística (Swain y Davis, 1978; Thomas et al., 1987b). Parte de asumir que los ND en una categoría se distribuyen normalmente, considerando la separabilidad como medida del solape entre categorías vecinas. Por cuanto se trata de calcular ese valor para un espacio multivariado (tantas variables como bandas intervienen en el proceso), se considera el vector de medias y la matriz de varianza-covarianza entre pares de categorías. La fórmula de cálculo se sintetiza de la forma siguiente:

$$Div_{AB} = 0{,}5\ Tr\ [(V_A - V_B)\ (V_B^{-1} - V_A^{-1})] + 0{,}5\ Tr\ [(V_A^{-1} + V_B^{-1})\ (M_A - M_B)(M_A - M_B)^T] \qquad [7.44]$$

donde Div_{AB} indica la medida de la divergencia entre las categorías A y B; Tr, se refiere a la traza o suma de los elementos de la diagonal de la matriz indicada [ ]; V_A y V_B son las matrices de varianza-covarianza de las categorías A y B; M_A y M_B son los vectores de medias correspondientes a las mismas categorías y bandas, y T indica la matriz traspuesta de la indicada entre paréntesis. Cuanto mayor sea el valor de la divergencia, mayor también la separabilidad entre clases, basada, lógicamente, sobre las bandas que se han considerado en su cálculo.

El problema fundamental de esta medida es que no se satura. Si se pretende relacionar la divergencia con la exactitud de la clasificación, esto implica que la exactitud aumentaría constantemente al aumentar el número de bandas implicadas, lo cual no es muy realista. Por esta razón, se recomienda acotar este valor en unos márgenes conocidos, definiéndose la divergencia transformada como (Kumar y Silva, 1977):

$$DT_{AB} = c\ (1 - \exp\ (-Div_{AB}/8)) \qquad [7.45]$$

donde c indica el valor máximo de la divergencia, señalándose habitualmente un valor de 2.000 (Haack, 1983), aunque algunos autores recomiendan utilizar un valor de 100 (Mather, 1987), para que los resultados puedan interpretarse como porcentajes.

La divergencia también se ha empleado como medida para seleccionar el conjunto de bandas que proporciona la mejor separación entre clases. En este sentido se calcula un valor promedio de divergencia, de acuerdo a (Richards, 1993):

$$\overline{div} = \Sigma_{i=1,m} \Sigma_{j=1,m}\, p(w_i)p(w_j)Div_{i,j} \qquad [7.46]$$

donde p (w_i) and p (w_j) indican las probabilidades *a priori* de las clases **i** y **j**, **m** el número de clases, y $Div_{i,j}$ es el valor de la divergencia entre esas clases. La divergencia promedio se calcula para cualquier combinación de **m** bandas, siendo la combinación ideal la que maximiza el valor global de separación entre clases

(Jensen, 1996, pp. 220-224). Además de la divergencia, se han propuesto otras medidas de separabilidad, como la distancia de Bhattacharyya o de Mahalanobis (Richards, 1993; Thomas et al., 1987b).

La tabla 7.6 incluye el cálculo de la separabilidad estadística para las clases seleccionadas sobre la imagen de Arganda. En este caso, la medida empleada ha sido la divergencia transformada [7.45]. Esta tabla nos permite confirmar las valoraciones previamente efectuadas sobre posibles confusiones entre clases. La clase más nítida es el agua, fácilmente separable del resto de las cubiertas, por su peculiar comportamiento espectral. Los suelos descubiertos, con poca o nula vegetación, también se diferencian con nitidez, si bien existe un pequeño solape con las superficies urbanas densas. La mínima distancia entre categorías se encuentra en las clases residencial y matorral.

Como antes indicamos, la divergencia también puede utilizarse para indicar la combinación idónea de bandas para la clasificación. En nuestro caso, se calculó para todas las combinaciones de tres bandas, obteniéndose que la 3,4 y 5 ofrecían la mayor separabilidad promedio entre categorías. La mínima separación, en estas tres bandas, sigue correspondiendo a las clases residencial y matorral.

Como principal conclusión de este epígrafe, parece deducirse que el análisis de las estadísticas de entrenamiento resulta muy conveniente para reflexionar sobre la conveniencia de la leyenda empleada, del tipo de información disponible, o del método emprendido para conseguir los resultados deseados. Salvado este análisis, puede iniciarse la fase de clasificación propiamente dicha, en la que no deben de producirse resultados muy distintos a los deducidos a partir de este previo estudio.

7.2.3. Fase de asignación

En esta fase se trata de adscribir cada uno de los píxeles de la imagen a una de las clases previamente seleccionadas. Esta asignación se realiza en función de los ND de cada píxel, para cada una de las bandas que intervienen en el proceso.

	Pastizal	Matorral	Pinar	Agua	Residencial	Urbano	Regadío
Matorral	1974,46						
Pinar	2000,00	1993,90					
Agua	2000,00	2000,00	2000,00				
Residencial	2000,00	1940,59	1999,79	2000,00			
Urbano	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	1999,92		
Regadío	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	
Suelo	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00	1999,73	2000,00

Tabla 7.6 - *Divergencia transformada entre las categorías de la imagen de Arganda*

Fruto de esta fase será una nueva imagen, cuyos ND expresen la categoría temática a la que se ha adscrito cada uno de los píxeles de la imagen original.

En este capítulo se tratan los criterios más empleados para realizar este proceso, en el contexto de las aplicaciones de la teledetección. Desde un punto de vista estadístico, todos ellos definen un área de dominio, en torno al centro de cada categoría a discriminar, mediante un conjunto de funciones discriminantes. Estas ecuaciones pueden considerarse, por tanto, como las fronteras que definen cada categoría. El píxel será asignado a una clase i, si sus ND se encuentran dentro del área de dominio señalado para dicha clase (fig. 7.30).

Los criterios más comunes para establecer estas fronteras estadísticas entre clases son: (i) mínima distancia, por el cual el píxel se asigna a la clase más cercana; (ii) paralelepípedos, que permite señalar al usuario unos umbrales de dispersión asociados a cada clase, y (iii) máxima probabilidad, en donde el píxel se asigna a aquella clase con la que posee mayor probabilidad de pertenencia. Frecuentemente se suelen agrupar en métodos no paramétricos, los dos primeros, y paramétricos, el último, en razón de si asumen o no que los ND en cada categoría se distribuyen normalmente. A continuación se describen, con más detalle, cada uno de estos criterios.

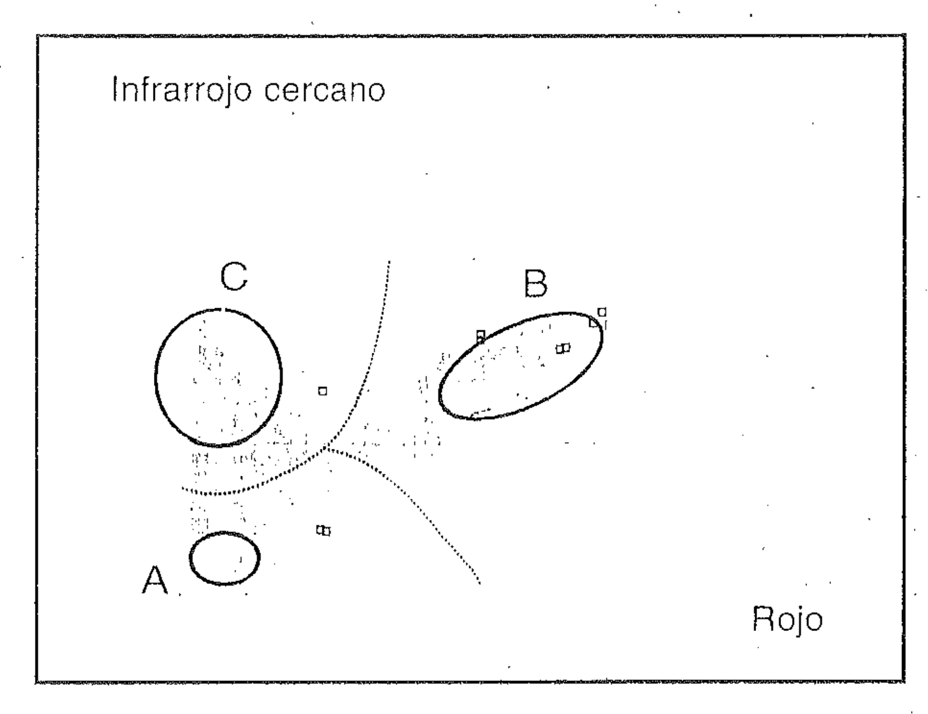


Fig. 7.30 - *Funciones discriminantes para la asignación digital*

7.2.3.1. Clasificador de mínima distancia

El criterio más sencillo para asignar un píxel a una de las categorías consiste en incluirlo en la más cercana; esto es, en aquélla que minimice la distancia entre ese píxel y el centroide de clase. Lógicamente, no se trata de una distancia geográfica, sino espectral, consecuencia de comparar los ND de cada píxel con los del centro de las distintas categorías, para todas las bandas que intervienen en el análisis.

Pueden considerarse varias formas de medir esa distancia espectral entre píxeles y clases. La más empleada, en este sentido, es la distancia euclidiana:

$$d_{x,A} = \sqrt{\sum_{i=1,m} (ND_{x,i} - \overline{ND}_{A,i})^2} \qquad [7.47]$$

donde $d_{x,A}$ es la medida de la distancia entre el píxel x y la categoría A; $ND_{x,i}$ el valor correspondiente al píxel a clasificar en la banda i, y $\overline{ND}_{A,i}$ el valor medio de esa categoría en la misma banda. Tras calcular esta medida para todas las categorías, puede obtenerse el valor $d_{x,A}$ más pequeño, asignando el píxel x a esa categoría (fig. 7.31). Como se trata de realizar comparaciones entre distancias, la fórmula anterior puede simplificarse eliminando la raíz cuadrada, ya que si un píxel es

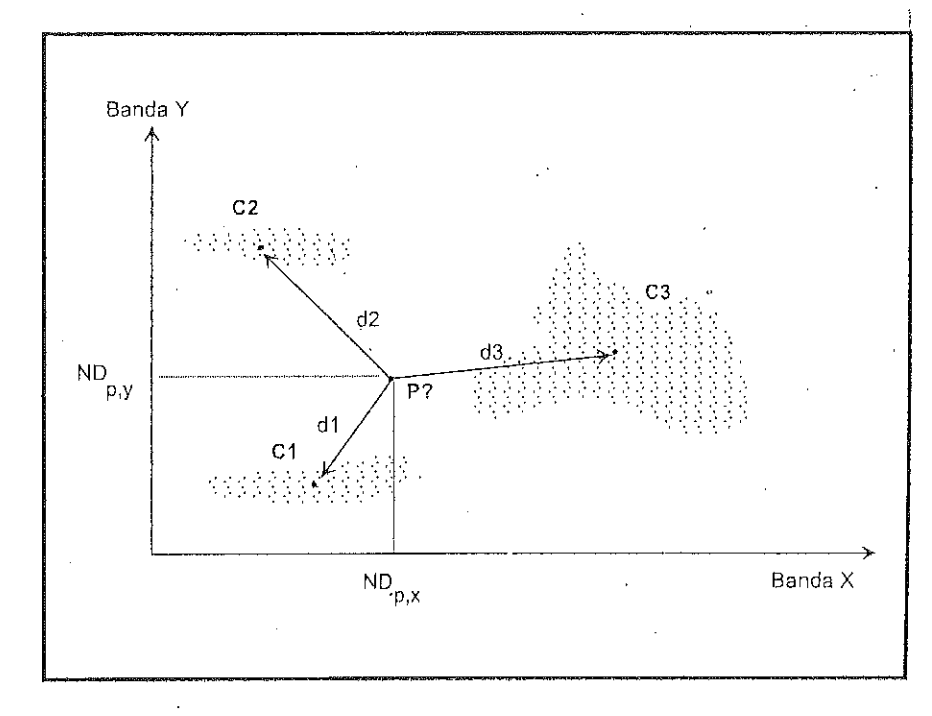


Fig. 7.31 - *Algoritmo de mínima distancia*

más cercano a una categoría por la distancia lineal (hipotenusa de sus valores espectrales), también lo será por la suma de sus catetos.

Este algoritmo es bastante sencillo y rápido de ejecutar, y puede ofrecer buenos resultados cuando no se observe un gran solape entre categorías. Puesto que siempre existe una clase más cercana, no deja lugar a píxeles sin clasificar, incluso aunque éstos se alejen notablemente del centro de clase. Esto puede provocar errores de comisión importantes, sobre todo cuando no se incluye en la leyenda alguna categoría claramente presente en la imagen.

La distancia que calcula este algoritmo es lineal; además, no considera la dispersión de cada categoría o la correlación que exista entre las bandas. Tiende, por tanto, a delimitar grupos circulares de radio proporcional a la situación de cada categoría.

Algunos autores han propuesto modificaciones en el cálculo de la distancia, de tal forma que se considere la varianza de las clases (Schowengerdt, 1983; Lo et al., 1986). De una u otra forma, el método de mínima distancia se ha empleado con frecuencia en aplicaciones temáticas, especialmente cuando el área de estudio no presentaba una gran complejidad (Sellman et al., 1977). Una excepción interesante a esta idea general es su aplicación a la cartografía de paisajes gallegos (López-Vizoso, 1987).

7.2.3.2. *Clasificador de paralelepípedos*

En este método, el usuario fija un área de dominio para cada categoría, teniendo en cuenta sus valores de centralidad y dispersión. Posteriormente, un píxel es asignado a dicha clase si sus ND están dentro de ese área de dominio, en todas las bandas consideradas. Esquemáticamente, el píxel x será asignado a la clase A si sus ND en las distintas bandas ($ND_{x,k}$) están incluidos en el área de dominio de esa clase:

$$\overline{ND}_{A,i} - R_{A,i} \leq ND_{x,i} \leq \overline{ND}_{A,i} + R_{A,i} \qquad [7.48]$$

para todo i, variando de 1 hasta el número de bandas. $R_{A,i}$ indica el rango de dispersión señalado para la categoría A en cada banda i.

En suma, el píxel x es asignado a la clase A si sus ND se encuentran a menos de una determinada distancia del centro de esa clase. Esa distancia se fija por el intérprete, aunque suele identificarse con la desviación típica, o con un múltiplo suyo. También pueden emplearse otros criterios como la desviación media, desviación intercuartílica o rango de la categoría. En cualquier caso, conviene considerar que cuanto mayor sea ese umbral, mayor también el número de píxeles

incluidos en esa clase, pero también más grande el riesgo de confusiones con categorías vecinas. De igual forma, un valor pequeño garantiza mayor fiabilidad en las asignaciones, pero supone un mayor número de píxeles sin clasificar.

Este criterio de asignación tiende a delinear unos polígonos multidimensionales de lados paralelos, de ahí su nombre, en torno al centro de cada categoría. Es un algoritmo bastante rápido de ejecutar, puesto que sólo requiere operaciones lógicas sencillas (del tipo IF ... THEN...). Por esta rapidez, se ha utilizado con frecuencia como primer acercamiento a la variabilidad de las distintas categorías (Miller y Williams, 1978; Robinove, 1979). Asimismo, se ha utilizado para lograr una primera estratificación de la imagen, aislando las categorías más singulares, para aplicar posteriormente otro criterio de asignación sobre los píxeles más problemáticos (Núñez et al., 1983; Mather, 1987).

Los principales problemas de este método parten de su misma concepción. El diseño de áreas de dominio puede implicar, por un lado, que haya píxeles en zonas comunes a dos o más categorías, y, por otro, que algunos píxeles queden sin clasificar (fig. 7.32).

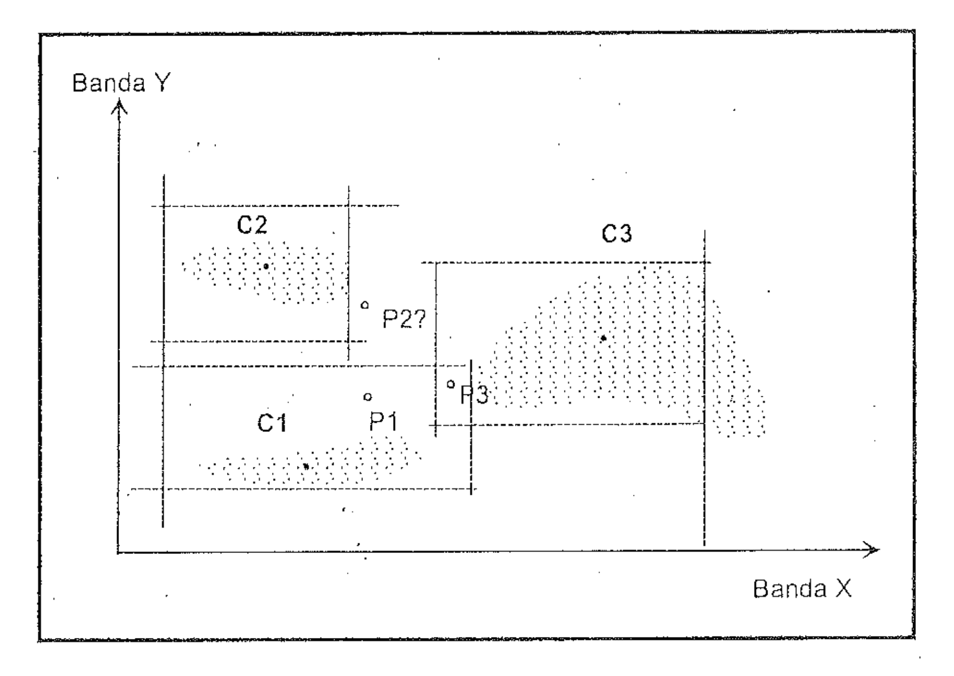


Fig. 7.32 - *Algoritmo de paralelepípedos. Se observan algunos de los problemas que lleva consigo esta técnica. En el caso del píxel 1 no observamos problemas; sin embargo, el píxel 2 no se encuentra en ninguna categoría (quedará como no clasificado) y el píxel 3 podrá asignarse aleatoriamente a dos categorías distintas.*

Respecto al primer problema, el solape entre paralelepípedos supone que un píxel pueda asignarse a dos categorías. Si el ordenador no cuenta con otro criterio, lo incluirá en la primera que cumpla los requisitos marcados en [7.48]. En consecuencia, algo tan intrascendente como el orden en el que se produce la asignación tiene una importante repercusión sobre los resultados. Algunos autores han propuesto modificar el criterio de asignación para estas áreas en conflicto, bien introduciendo la regla de mínima distáncia (Cosentino et al., 1981), bien ajustando interactivamente las fronteras entre clases (Lillesand y Kiefer, 1994), bien creando clases mixtas.

Respecto a los píxeles sin clasificar, la solución pasa por ampliar paulatinamente el rango de dispersión, estableciendo un equilibrio entre los píxeles no clasificados y los solapes entre clases vecinas. También conviene, en estos casos, repasar la definición espectral de las categorías, puesto que la presencia de píxeles sin asignación es indicio de clases espectrales mal definidas o no incluidas en la leyenda de trabajo.

7.2.3.3. *Clasificador de máxima probabilidad*

Este método considera que los ND en el seno de cada clase se ajustan a una distribución normal. Esto nos permite describir esa categoría por una función de probabilidad, a partir de su vector de medias y matriz de varianza-covarianza. En pocas palabras, esa función asemeja la distribución real de los ND en esa categoría, por lo que nos sirve para calcular la probabilidad de que un píxel (con un determinado ND) sea miembro de ella. El cálculo se realiza para todas las categorías que intervienen en la clasificación, asignando el píxel a aquélla que maximice la función de probabilidad.

El clasificador de máxima probabilidad es el más complejo y el que demanda mayor volumen de cálculo. Sin embargo, es el más empleado en teledetección, por su robustez y por ajustarse con más rigor a la disposición original de los datos.

7.2.3.3.1. Fundamento del método

Para comprender mejor su funcionamiento, basta poner un sencillo ejemplo ideado por Swain y Davis (1978). Supongamos que se cuenta con dos pares de dados, uno normal (caras numeradas de 1 a 6) y otro con un par de puntos adicionales en cada cara (numerados de 3 a 8). Conociendo el valor de una tirada, el problema sería estimar de cuál de los dos pares de dados procede. Un criterio razonable de asignación sería calcular la probabilidad de que esa tirada se haya realizado con los dados normales o con los aumentados, asignando la tirada desconocida al par de dados más probable. Por ejemplo, si obtenemos un tirada de 7, la probabilidad de haber tirado con los dados normales es 6/36 (6 casos favorables, frente a los 36 posibles)[5]. Para los dados aumentados, la probabilidad es menor, 2/36[6], por lo que la tirada se asigna al par de dados normal.

El mismo criterio podría seguirse para decidir la asignación de cualquier otra puntuación. Basta construir las funciones de probabilidad asociadas con cada par de dados. Para el par normal, tendríamos una distribución centrada en el valor 7 (máxima probabilidad), con un mínimo de 2 y un máximo de 12. Para el par aumentado, el valor más probable se encontraría en 11, situándose la curva entre 6 y 16 (fig. 7.33a). A partir de esta gráfica, se observa que la probabilidad de haber usado los dados normales es mayor que la de haber usado los aumentados si obtenemos una tirada inferior a 8, es menor si la tirada superó 10 y es idéntica si la tirada fue 9. En definitiva, la frontera para asignar la tirada a un par de dados u otro se establece en la intersección entre sus respectivas funciones de probabilidad.

Esto no significa, obviamente, que no pueda producirse una tirada mayor a 9 con el par de dados normal, ni inferior a 9 con el aumentado. En otras palabras, la regla no es completamente certera, pero sí bastante razonable. Sólo es plenamente fiable para valores superiores a 12 o inferiores a 6, puesto que ahí no existe solape entre categorías. En suma, si existe conflicto natural entre clases, no es posible separarlas con total fiabilidad. Los errores serán tanto mayores cuanto mayor sea el solape entre las funciones de probabilidad.

Continuando el ejemplo, supongamos que al par de dados normal le modificamos alguna cara, para que las puntuaciones vayan de dos a cinco, repitiendo, en lugar del 1 y el 6, las puntuaciones 3 y 4. Esto no implicaría modificar el valor central de la distribución, que seguiría siendo 7. Sin embargo, sí cambia la anchura de la curva, las puntuaciones están más cercanas a la media, hay mayor homogeneidad. Eso conlleva que las asignaciones que se hagan a partir de la distribución de probabilidad serán más seguras. El punto de corte sigue estando en 9, pero a partir de ese valor la probabilidad de encontrar puntuaciones superiores con el par de dados normal se reduce drásticamente (fig. 7.33b). Esto implica que a mayor homogeneidad, o si se prefiere menor varianza, la discriminación de categorías resulta más certera.

El ejemplo puede aplicarse fácilmente al contexto de la clasificación digital. El par de dados a estimar puede sustituirse por las distintas categorías que quieren discriminarse, y las tiradas por los ND de los píxeles a clasificar. En el caso de los dados, podemos calcular *a priori* la probabilidad de pertenencia asociada con

[5] Podría haberse obtenido un 7 por las siguientes combinaciones de los dos dados: 1 y 6, 6 y 1, 2 y 5, 5 y 2, 3 y 4, y 4 y 3.

[6] Sólo puede obtenerse un 7, en este caso, por combinación de 3 y 4, y 4 y 3.

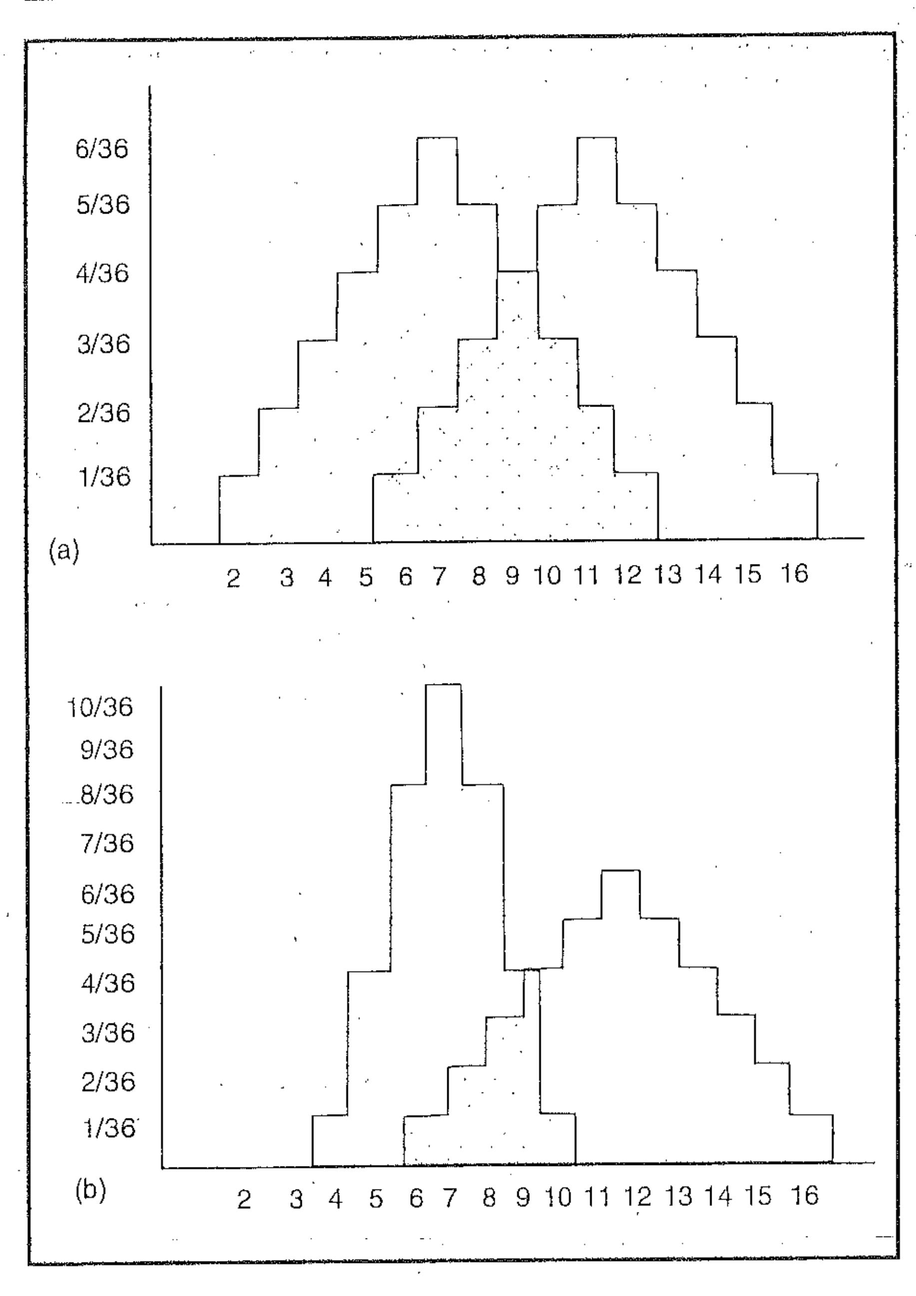


Fig. 7.33 - *Fundamentos del algoritmo de máxima probabilidad: (a) Curvas de probabilidad para la puntuación posible con el par de dados normal (izquierda) y el par de dados aumentado (derecha). (b) Si se reduce el rango de puntuaciones en una de las categorías (menor varianza) las asignaciones son más seguras.*

cada tirada, pues conocemos la distribución de todas las posibles tiradas. Para el caso de la clasificación de categorías temáticas es preciso estimar esa distribución de probabilidad para cada categoría, a partir de las medidas realizadas sobre las áreas de entrenamiento. Con este fin, se considera que los ND en el seno de cada clase se distribuyen normalmente, por lo que basta conocer la media y la desviación típica de cada categoría para calcular la probabilidad asociada con un determinado ND. En el caso de trabajar con una sola banda, podríamos calcular esa probabilidad de acuerdo a:

$$p(x/A) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_A^2}} \exp\left\{-(ND_x - \overline{ND_A})^2 / 2\sigma_A^2\right\} \qquad [7.49]$$

Esto es, la probabilidad de que un píxel x, definido por un determinado ND_x, pertenezca a la clase A, puede calcularse a partir de la media ($\overline{ND_A}$) y la varianza (σ_A^2) de esa clase. Una vez determinada la probabilidad de pertenencia al resto de las categorías que intervienen en la clasificación, ese píxel será asignado a la clase A, sólo si:

$$p(x/A) \geq p(x/B) \qquad [7.50]$$

para todo A ≠ B, variando B desde 1 hasta **m**, siendo **m** el número de categorías.

Con el propósito de agilizar el cálculo, habitualmente se transforma la fórmula anterior en una función lineal, mediante el empleo de logaritmos (Schowengerdt, 1983):

$$\ln p(x/A) = -0{,}5 \ln(2\pi) - 0{,}5 \ln \sigma_A^2 - \{(ND_x - \overline{ND_A})^2 / 2\sigma_A^2\} \qquad [7.51]$$

La expresión puede simplificarse aún más si eliminamos el primer término (-0.5 ln (2π)), por cuanto nos interesa sólo un cálculo de la probabilidad relativo a las distintas clases, y ese valor es una constante para todas ellas. Por la misma razón, no resulta necesario reconvertir a antilogaritmos el valor calculado, ya que si el logaritmo de la probabilidad es mayor en una categoría que en otra, también lo será su antilogaritmo. Por último, el segundo término ($0{,}5 \ln \sigma_A^2$) puede calcularse inicialmente para cada categoría, quedando así reducido el cálculo, para cada píxel, a la última expresión.

Volviendo al ejemplo anterior, podría también ocurrir que contáramos con dos pares de dados normales y sólo con uno aumentado. En este caso, no sólo tendremos que considerar el valor de la tirada para identificarla como perteneciente a uno u otro tipo de dados, sino también la probabilidad *a priori* de que aparezca una tirada de cada par de dados, en función de su número. En muchas aplicaciones de la teledetección también se produce este fenómeno. Algunas de las categorías cuentan con mayor extensión superficial, y, por tanto, presentan mayor probabilidad

de albergar píxeles desconocidos. Al considerar la probabilidad *a priori* de cada categoría p(A), se introduce un nuevo factor en el criterio de decisión arriba enunciado [7.50]. De esta forma, un píxel pertenece a la clase A, si:

$$p\,(x/A)\;p\,(A) \geq p\,(x/B)\;p\,(B) \qquad [7.52]$$

para todo $A \neq B$, donde p (x/A) indica la probabilidad de que un píxel x con un ND determinado, pertenezca a la clase A, y p (A) la probabilidad *a priori* de que un píxel cualquiera se incluya en esa clase.

La figura 7.34 expresa gráficamente el efecto de introducir esta opción, denominada clasificación bayesiana (Schowengerdt, 1983). El punto de corte entre las distribuciones de probabilidad, se desplaza hacia un lado u otro del original, en función del valor de la probabilidad *a priori*. Recuérdese que la intersección entre curvas marca la frontera en el área asignada a cada categoría, por lo que este factor puede modificar significativamente los resultados.

Con ser de gran interés, el empleo de este parámetro resulta bastante complejo, especialmente para establecer un criterio riguroso que permita estimar los valores de probabilidad *a priori* para cada clase. Un posible criterio sería conceder a cada categoría una probabilidad equivalente a la superficie que ocupa en la zona de estudio. Esto requiere, naturalmente, contar con un inventario previo, que raras veces está disponible. Indirectamente, sin embargo, puede calcularse la importancia superficial de cada clase mediante trabajos de campo, datos auxiliares o empleando los resultados de una clasificación previa. Por último, también puede

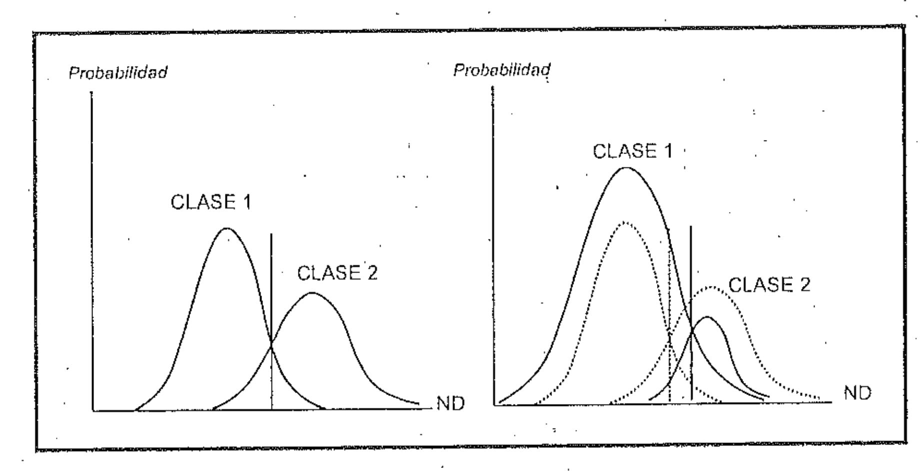


Fig. 7.34 - *Efecto de considerar la probabilidad a priori. A la derecha aparece una mayor ponderación de la clase 1, lo que implica trasladar la frontera entre las clases hacia la derecha, en detrimento de la clase 2.*

optarse por obviar este criterio, simplemente otorgando la misma probabilidad *a priori* a todas las categorías.

El interés de ponderar la probabilidad de cada clase se ha puesto en evidencia por distintos autores (Strahler, 1980). En aquellas ocasiones en las que se cuenta con un criterio sólido para estimar esas probabilidades, se ha comprobado que mejoran la asignación significativamente (Miller et al., 1978; Mergerson, 1981; Valerio y Ledesma, 1981).

7.2.3.3.2. Extensión a varias bandas

Hasta el momento, hemos analizado el criterio de máxima probabilidad para el caso de una sola banda. Lo habitual será, no obstante, que se empleen varias bandas para la clasificación, por lo que resulta preciso extender a varias dimensiones lo hasta aquí comentado.

Para el caso de dos bandas, los límites de las categorías tienen una forma elipsoidal (fig. 7.35). Cada una de estas elipses define un determinado nivel de probabilidad asociado a una categoría. Cuanto mayor sean las zonas de solape entre ellas, tanto mayor el riesgo de confusión mutua.

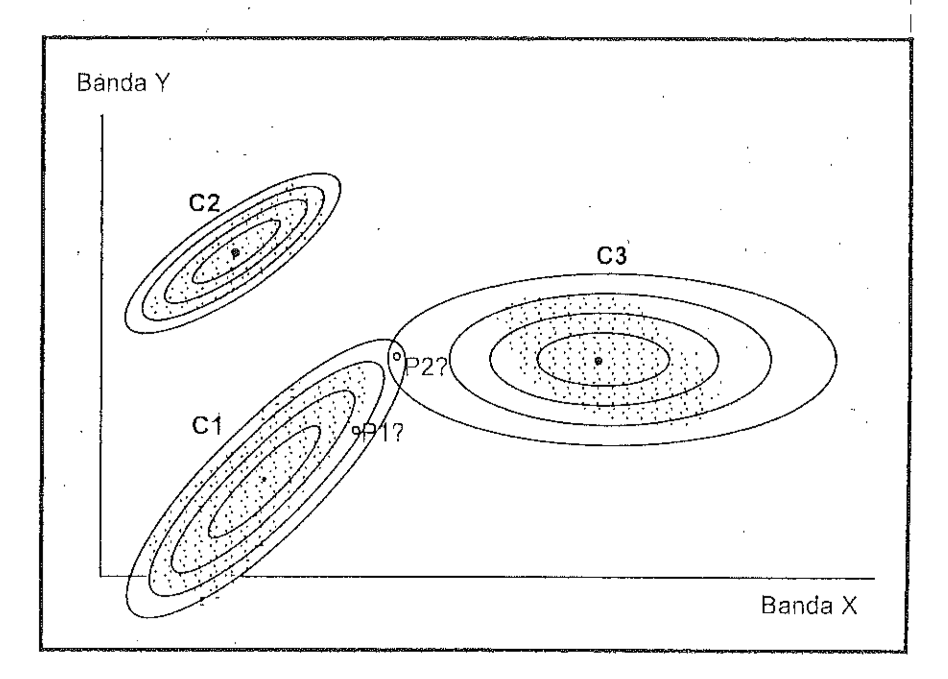


Fig. 7.35 - *Extensión a dos bandas del algoritmo de máxima verosimilitud*

Con más de dos dimensiones, no es posible representar gráficamente este criterio de clasificación. Basta extender la fórmula de la probabilidad normal arriba apuntada:

$$p\,(x/A) = (2\pi)^{-m/2}\,|V_A|^{-0,5} \exp\,\{-0,5\,(M_x - M_A)^T\, V_A^{-1}\,(M_x - M_A)\} \qquad [7.53]$$

donde m indica el número de bandas, $|V_A|$ la determinante de la matriz de varianza-covarianza para la clase A; M_x el vector de ND asociado con el píxel x; M_A, el vector de ND medios de la categoría A, y los superíndices T y -1, la traspuesta y la inversa de las matrices a las que afectan, respectivamente. Esta fórmula también puede simplificarse mediante el uso de logaritmos (Schowengerdt, 1983):

$$\ln p\,(x/A) = (-0,5 \ln V_A) - (0,5\,(M_x - M_A)^T\, V_A^{-1}\,(M_x - M_A)) \qquad [7.54]$$

una vez suprimidos los términos constantes de la fórmula anterior.

Pese a estas simplificaciones, este método de asignación exige un gran volumen de operaciones. Con el fin de reducir el tiempo invertido en el proceso, algunos autores han propuesto métodos alternativos para el cálculo de la probabilidad. Las tablas de probabilidad, similares a las CLUT vistas anteriormente (cap. 6.6), parecen ser la solución más ventajosa a este respecto (Mather, 1987, pp. 304-307).

Una vez que el ordenador culmine la asignación de los píxeles de la imagen, es posible establecer unos umbrales de probabilidad para cada categoría, de tal forma que se rechacen aquellos píxeles con una probabilidad de pertenencia muy baja (fig. 7.36). Este proceso, posterior a la clasificación propiamente dicha, pretende evitar aquellos píxeles con un grado de asociación muy bajo, reduciendo así los errores de comisión debidos a una mala definición espectral de algunas categorías.

Esto llevará consigo la aparición de píxeles no clasificados. Si su número es considerable, convendrá retornar a la fase de entrenamiento, con objeto de deducir nuevas categorías o perfeccionar la definición de las ya existentes. El criterio de máxima probabilidad asume que las categorías presentan una distribución normal. Este requisito ha sido comprobado en numerosos estudios, además de que no se han detectado alteraciones notables de los resultados en el caso de distribuciones sesgadas (Swain y Davis, 1978).

Gracias a su solidez estadística, el criterio de máxima probabilidad fue el aplicado a la clasificación de la imagen de Arganda. Se realizaron dos intentos: (i) partiendo de las estadísticas generadas en el entrenamiento supervisado de la imagen, y (ii) sobre las obtenidas en el método no supervisado.

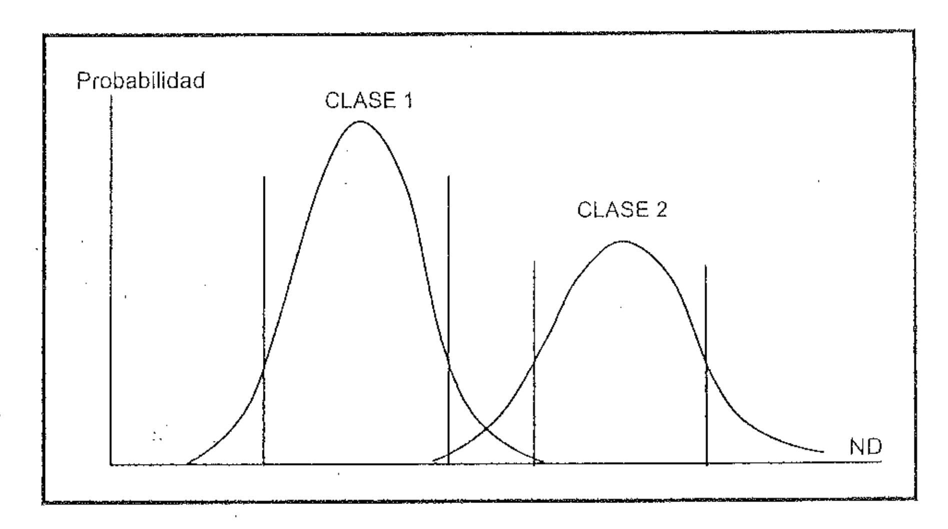


Fig. 7.36 - *Efecto de considerar la probabilidad a posteriori. En términos prácticos implica eliminar las colas de la distribución, de tal forma que sólo se mantengan en una clase los píxeles más probables de pertenecer a ella.*

Para el área de estudio que venimos comentando en este capítulo, la aplicación del criterio de máxima probabilidad permitió generar una clasificación bastante atinada (fig. 7.37*). Las principales confusiones se observaron entre las categorías urbanas y los pastizales y matorrales. Como es bastante habitual en este tipo de estudios, se clasifican como áreas urbanas zonas de vegetación poco densa y seca, en nuestro caso en las inmediaciones del escarpe yesífero del cerro del Piul. Asimismo, se clasifican como urbanas las explotaciones de grava, bastante frecuentes a lo largo del curso del Jarama. Por su parte, los cultivos de regadío, láminas de agua, y cubiertas forestales han sido bien delimitados, así como los suelos descubiertos.

En cuanto al análisis no supervisado, el algoritmo de agrupación automática seleccionó 19 clases finales, de un máximo de 20 previamente fijado (fig. 7.38*). Las estadísticas generadas por este agrupamiento, se introdujeron en el clasificador de máxima probabilidad, con objeto de introducir todos los píxeles de la imagen en uno de los grupos. La interpretación de las categorías deducidas por el programa no resulta siempre sencilla. En el caso de esta imagen, se han reconocido como grupos espectrales coherentes todas las categorías seleccionadas en el análisis supervisado, aunque la urbana densa muestra confusiones con otras superficies de vegetación herbácea seca. Las urbanizaciones residenciales de Rivas se han asignado con cierta corrección, aunque presentan algunas confusiones con pequeñas parcelas de regadío, mezcladas con cubiertas urbanas en las inmediaciones de Arganda. La delimitación de cultivos de regadío es menos nítida que en la clasificación supervisada, y los matorrales y láminas de agua ofrecen similares precisiones.

7.2.3.4. Otros criterios de asignación

Si bien el clasificador de máxima probabilidad es el más ampliamente utilizado en clasificación digital de imágenes, sus limitaciones en cuanto al cálculo y la exigencia de contar con distribuciones normales hacen que se hayan buscado criterios alternativos, menos sensibles a esos requisitos.

7.2.3.4.1. Clasificadores en árbol

Uno de los métodos más sencillos, pero también más eficientes de clasificación alternativa es el denominado clasificador en árbol (*decision tree classifier*). La idea de fondo consiste en discriminar secuencialmente cada una de las categorías, de acuerdo a unos criterios seleccionados por el intérprete. Por ejemplo, puede reconocerse las láminas de agua por un ND inferior a un cierto umbral en la banda infrarroja, o la vegetación por una combinación de cierto umbral en el visible e infrarrojo cercano. En su origen, estos criterios estaban basados exclusivamente sobre los datos espectrales de la imagen, pero en los últimos años se ha promovido el empleo de este tipo de criterios de decisión considerando igualmente variables auxiliares, como mapas de suelos o modelos digitales de elevación.

Bajo ese punto de vista, el clasificador en árbol puede considerarse como un sencillo ejemplo de sistema experto (Skidmore, 1989), tan extendido en los últimos años en el marco de las denominadas técnicas de inteligencia artificial. En pocas palabras, un sistema experto está formado por un conjunto de reglas que permiten al ordenador tomar una serie de decisiones en función de los valores que observa en la imagen y/o en información auxiliar de la misma zona. Esas reglas se introducen al ordenador en forma de operadores lógicos condicionales, del tipo IF... THEN... , que intentan simular la toma de decisiones que realiza un intérprete (Richards, 1993, cap. 12). Por ejemplo, si somos capaces de distinguir la vegetación forestal de la herbácea es por que asociamos los criterios de tono y textura. De modo similar, podríamos indicarle al ordenador una regla del tipo siguiente:

IF $ND_{IR} / ND_{R} \geq 2$ AND *Textura* = Rugosa THEN *Bosque*

IF $ND_{IR} / ND_{R} \geq 2$ AND *Textura* = Lisa THEN *Prados*

el primer término lo podría tomar de una imagen óptica y la textura de una imagen radar de la misma zona. De forma similar se pueden introducir variables no obtenidas por teledetección, como cartografía temática, límites administrativos o modelos digitales de elevación. El establecimiento de los criterios de decisión se realiza por un experto en el reconocimiento de cada categoría de interés, que conozca sus condiciones ambientales para la zona en la que se trabaja. Por ejemplo, para el reconocimiento de una especie forestal, serían relevantes el calendario

fenológico, la situación topográfica, el tipo de litología asociado, o la rugosidad. Con este enfoque Skidmore (1989) realizó un inventario de eucaliptos en Australia, a partir de imágenes de satélite e información auxiliar. Este autor observó una mejora significativa en la clasificación, mediante el empleo de una tabla de probabilidades asociada a la ocurrencia del eucalipto en distintas variables auxiliares. También podrían incorporarse criterios temporales o espaciales, como sería la probabilidad de que un cierto cultivo suceda a otro o esté próximo a otro (Middelkoop y Janssen, 1991). Naturalmente, los sistemas expertos también pueden aplicarse a otras operaciones de análisis de la imagen, como son los realces o las correcciones radiométricas y geométricas (Schowengerdt y Wang, 1989).

Un sencillo ejemplo de clasificación en árbol sería el incluido en la figura 7.39. El criterio de decisión se basa en unas hipotéticas estadísticas de entrenamiento para una serie de clases de cobertura del suelo (tabla 7.7). En este caso, el análisis se realiza sobre cuatro bandas del sensor TM: la 2 (verde), 3 (rojo), 4 (infrarrojo cercano) y 7 (infrarrojo medio), y un modelo digital de elevaciones (MDE). A partir de estos valores puede diseñarse un gráfico de dispersión espectral,

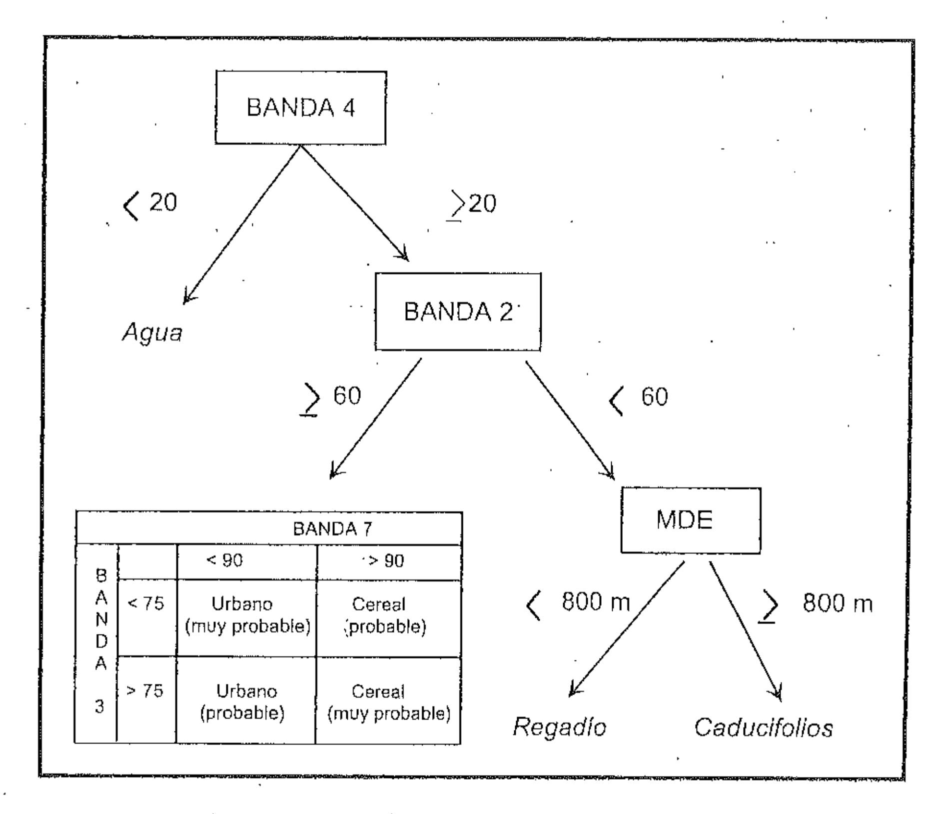


Fig. 7.39 - *Ejemplo de clasificación en árbol*

	B2		B3		B4		B7	
	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s	$\bar{x}$	s
AGUA	28	5,0	20	4,5	11	2,5	4	2,4
CEREAL	68	2,2	80	10,1	101	13,4	99	8,3
REGADÍO	40	5,8	45	4,5	96	7,3	44	2,9
CADUCIFOLIO	35	3,2	48	6,0	100	10,5	40	3,5
URBANO	54	6,2	70	4,5	73	10,2	80	11,2

Tabla 7.7 - *Medidas estadísticas para distintas cubiertas*

considerando el rango como la media ± 2 desviaciones típicas. Con ayuda de este gráfico podemos diseñar un árbol de decisiones que nos permita separar las cinco categorías. El primer paso consiste en separar los píxeles pertenecientes a la categoría más fácilmente discriminable, el agua. Para ello, se emplea la banda 4, utilizando un umbral máximo de 20. Por tanto, los píxeles con un ND ≤ 20 en esa banda serán etiquetados como clase agua y extraídos de la imagen para evitar que intervengan en pasos sucesivos. Posteriormente se emplea la banda 3 para discriminar las clases regadío y caducifolios del resto, indicando que el ND sea inferior a 60. Con las categorías urbano y cereal es preciso realizar el ajuste en dos bandas, puesto que existe un cierto solape en todas ellas. Sin embargo, la separación es mayor en la banda 7, señalando sobre ella un umbral de 90 para señalar la distinción entre ambas cubiertas, completándolo con otro umbral de 75 en la banda 3. Finalmente, entre la clase caducifolios y regadío, bastante mezcladas espectralmente, utilizamos un criterio basado en la altitud: asumiendo que en la zona sólo se dan cultivos en regadío por debajo de 800 metros, utilizamos el modelo digital de elevaciones para establecer esta distinción.

Los problemas de clasificación reales son más complejos, pero también pueden enriquecerse notablemente las reglas de decisión. Una vez ajustadas adecuadamente, resulta un criterio muy rápido de clasificación, y permite introducir información auxiliar que resulta ajena a los clasificadores estadísticos convencionales.

7.2.3.4.2. Clasificadores basados en el contexto espacial

A lo largo de esta obra, hemos visto en diversas secciones que los rasgos espectrales de una determinada cubierta pueden presentar notables afinidades con otras, aunque posea componentes distintos. La aparente paradoja se relaciona con varios factores:

(i) resolución espectral del sensor, bien por contar con pocas bandas espectrales, bien por ser éstas excesivamente anchas para detectar variaciones en rangos muy específicos de variación espectral;

(ii) resolución espacial, que da lugar a la aparición de señales mixtas entre dos o más cubiertas;

(iii) resolución temporal, que conlleva la confusión de ciertas cubiertas en momentos específicos de su desarrollo fenológico.

En consecuencia, para discriminar dos cubiertas puede ser necesario acudir a criterios no estrictamente espectrales, como serían los derivados de la variación espacial de cada píxel, en una cierta área de vecindad, o su situación respecto al resto de los píxeles que forman la imagen. Hasta aquí hemos analizado criterios de clasificación basados exclusivamente en los ND de cada píxel; en ocasiones, será preciso incorporar otros criterios de identificación, como son la textura o el contexto, basados en las relaciones espaciales entre los píxeles de la imagen, de modo similar a los utilizados en análisis visual (cap. 5).

La distinción entre los criterios de textura y contexto hace referencia al área que se considera en la medición de las relaciones espaciales (Gurney y Townshend, 1983). El primer concepto se relaciona con la variación espacial dentro de grupos contiguos de píxeles. El segundo, iría encaminado a medir las relaciones espaciales de cada píxel con el resto de la escena. Por simplificar las cosas, incluiremos ambos en el mismo epígrafe, ya que los dos están encaminados a aportar criterios espaciales a la clasificación de imágenes.

Hasta el momento, los métodos para introducir el contexto espacial en la interpretación digital pueden agruparse en función de la fase de la clasificación en la que intervienen. Así, podemos distinguir entre aquéllos que generan bandas texturales previas a la clasificación, los que emplean el contexto durante la clasificación y los que lo consideran después de la asignación, con objeto de refinar los resultados.

Más adelante tendremos ocasión de comentar algunas técnicas para obtener información textural de la imagen (cap. 7.4.2). Por el momento, baste decir que se trata de métodos que generan una nueva imagen en la que el ND mide el grado de contraste espacial con los píxeles vecinos (habitualmente con los 8 circundantes). Estas medidas de textura se han desarrollado especialmente en el campo de las aplicaciones urbanas, ya que la clasificación de estas zonas resulta muy problemática por la gran variedad espectral de las superficies que las componen. Entre los criterios más interesantes está el propuesto por Gong y Howarth (1990a). Estos autores pretendían discriminar áreas urbanas y rurales en la frontera rur-urbana de una ciudad canadiense. Para ello, incorporaron a la clasificación una imagen de «densidad de bordes», obtenida a partir del siguiente proceso: (i) aplicar un filtro laplaciano a la banda 1 de una imagen SPOT-XS, (ii) segmentar el resultado para dejar únicamente las fronteras entre cubiertas, (iii) hallar la densidad de bordes a través de una ventana móvil (número de píxeles fronterizos dividido por número

de píxeles en la ventana; en este caso de 25 x 25 píxeles), y (iv) incorporar esa banda textural a la clasificación multibanda. Esa incorporación mejoró significativamente los resultados al reducir la confusión entre clases rurales y urbanas de similares características espectrales (p.ej., cultivos y jardines). También resulta de gran interés el clasificador de contexto propuesto por Moller-Jensen (1990), que parte de delimitar polígonos en una zona urbana mediante la localización automática de segmentos lineales (calles anchas o ríos). Los segmentos se clasifican de acuerdo a sus ND medios, así como a medidas de textura, contigüidad y distancia al centro de la ciudad.

El análisis del contexto previo a la clasificación puede abordarse también en la fase de entrenamiento. Un enfoque original, en este sentido, es el denominado clasificador ECHO (*Extraction and Classification of Homogeneous Objects*, Ketting y Landgrebe, 1975). Pretende clasificar una imagen en áreas compuestas por píxeles de similares características, antes de que éstos sean asignados a categorías. Posteriormente, la clasificación se realiza sobre estas áreas, en lugar de sobre píxeles aislados. La delimitación de esas áreas homogéneas se basa en los criterios de similitud espectral y contigüidad. Tras localizar un pequeño grupo de píxeles con ND similares, el algoritmo va incorporando progresivamente píxeles vecinos, siempre que estén dentro de un criterio de homogeneidad señalado por el usuario (por ejemplo, a menos de una determinada distancia espectral). Cuando los píxeles vecinos no son suficientemente homogéneos se detecta una frontera o un área pequeña de distinta ocupación (isla). Estas zonas se clasifican posteriormente de acuerdo a los criterios tradicionales, antes comentados. El proceso de crecimiento de las áreas continúa hasta que topan con píxeles muy contrastados, con lo que el proceso se detiene. En este punto, la imagen aparece segmentada en áreas homogéneas, aunque éstas aún no se hayan asignado a ninguna categoría temática. Esta asignación se realiza calculando las estadísticas elementales de los píxeles incluidos en cada área, y aplicando sobre ellas uno de los criterios de asignación antes comentados. En ese punto, no serán asignados píxeles individuales sino las áreas completas, por lo que la posibilidad de error tiende a reducirse considerablemente (Hoffer y Swain, 1980; Campbell, 1987).

En el segundo grupo de clasificadores de contexto estarían aquellos que incorporan este criterio en el propio algoritmo de asignación. Se trata, en términos sencillos, de considerar los ND de los píxeles vecinos en la asignación de un determinado píxel a una clase. Por ejemplo, puede incorporarse al criterio de máxima probabilidad algún parámetro que considere la probabilidad de asignación de los píxeles vecinos (Richards, 1993):

$$p'(x / c_i) = \frac{p(x / c_i)q(x / c_i)}{\Sigma_{i=1,m}\, p(x / c_i)q(x / c_i)} \qquad [7.55]$$

donde $p(x / c_i)$ indica la probabilidad de que el píxel x pertenezca a la categoría c_i, para todas las categorías m y $q(x / c_i)$ una función de vecindad, definida por el usuario, que habitualmente está relacionada con la distancia. Éste o similares criterios se han empleado con buenos resultados en distintas clasificaciones temáticas (Danjoy y Sadowski, 1978; González y López, 1991).

Finalmente, podemos señalar aquellos criterios que introducen el contexto para refinar los resultados de la clasificación. En este sentido la contigüidad espacial puede aplicarse a partir de un filtro modal, que cambia la asignación de un píxel si su categoría no coincide con la categoría modal o mayoritaria de una ventana de píxeles próximos. Resulta bastante frecuente que los resultados de una clasificación digital adolezcan de una excesiva fragmentación. En otras palabras, las diversas categorías se imbrican entre sí, en una compleja sucesión espacial. Manchas de color, más o menos homogéneas, se encuentran salpicadas por píxeles asignados a otras categorías, perdiéndose su unidad geográfica y dificultando la interpretación de los resultados. Este suceso se denomina coloquialmente, en la bibliografía anglosajona, «efecto de sal y pimienta» (*salt and pepper*), y se debe por un lado, a que la mayor parte de los criterios de asignación no tienen en cuenta la pertenencia de píxeles vecinos y, por otro, a la propia complejidad del paisaje, directamente relacionada con la aparición de píxeles de borde —fronterizos a dos o más categorías— que son los principales responsables de la discontinuidad visible en el mapa.

Para solventar este problema, suele aplicarse una técnica de suavización de resultados, similar en la concepción, aunque no en la ejecución, a los filtros de paso bajo. Como ya hemos visto, sobre la imagen clasificada no puede aplicarse un filtro aritmético, ya que sus ND no guardan una relación cuantitativa entre sí, sino que sólo son etiquetas que definen las distintas categorías. Cualquier promedio de píxeles vecinos introduciría cambios imprevisibles en la clasificación, ya que no se trata de una imagen de tono continuo, sino de una imagen categorizada, en donde no tiene sentido establecer análisis de gradientes. Por esta razón, se aplican sobre la imagen otros esquemas de filtraje, basados sobre medidas categóricas en lugar de sobre promedios (Thomas, 1980).

El objetivo último es reasignar aquellos píxeles aislados o poco significativos, facilitando una distribución espacial más nítida de las distintas categorías. Para ello, se procede a comparar la clase asignada a cada píxel con la que ofrecen los vecinos. Si esa clase es la misma de la mayor parte de los píxeles del entorno, se mantiene la asignación original; caso contrario, se modifica. Normalmente esta comparación se realiza a partir de una ventana móvil de 3 x 3 píxeles, si bien la técnica es independiente de su tamaño. En la terminología habitual se distinguen, a este respecto, dos tipos de filtros (fig. 7.40):

(i) Filtro modal, en el cual, el píxel situado en el centro de la matriz se asigna a la categoría más frecuente entre los píxeles vecinos, siempre que, lógicamente, no pertenezca ya a ella.

Matriz Original

2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	5	9	8	8
2	4	8	13	13	7	13
4	9	7	7	9	7	4
7	7	4	7	7	4	4
4	4	4	5	9	9	9

Matriz filtrada (mayoría)

2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	9	8	8
2	2	8	13	13	7	13
4	9	7	7	7	7	4
7	4	4	7	7	9	4
4	4	4	5	9	9	9

Matriz filtrada (moda)

2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	8
2	2	2	13	7	7	8
4	4	7	7	7	7	4
4	4	7	7	7	4	4
4	4	4	5	9	9	9

Fig. 7.40 - *Reducción del ruido de la escena mediante filtros categóricos*

(ii) Filtro de mayoría. El píxel central se asigna a la categoría que cuente con la mitad más uno de los píxeles vecinos. En caso de que ninguna categoría rebase ese valor, el píxel central mantiene su asignación primitiva.

La elección entre uno u otro método depende del tipo de paisaje analizado y del algoritmo que se haya empleado en la clasificación. Lógicamente, el primero ofrece una mayor generalización que el segundo, por lo que puede ser conveniente su empleo en caso de paisajes muy complejos y cuando la escala de trabajo sea regional o global.

Se ha comprobado por diversos autores, que la aplicación de esta técnica proporciona un aumento significativo de la exactitud conseguida en la clasi-

ficación (Booth y Oldfield, 1989; Castro y Chuvieco, 1995). Este efecto es debido, principalmente, a la eliminación de asignaciones anómalas debidas a píxeles de borde.

Otros criterios de re-clasificación pueden basarse en las propiedades espaciales de los píxeles, como su distancia, conectividad o inclusión. Un sencillo ejemplo del interés de estas relaciones es la discriminación entre cultivos herbáceos de regadío y parques urbanos. Ambas cubiertas presentan un comportamiento espectral similar, ya que de hecho ambas se riegan en verano y están compuestas por vegetación herbácea. Por tanto, para separarlas es preciso acudir al contexto espacial: un parque estará emplazado en el interior de un área urbana, por lo que puede considerarse como tal si los píxeles situados a un cierto radio han sido asignados a la categoría urbana, asignándose a cultivos de regadío en caso contrario. Un criterio similar de contigüidad espacial se utiliza por Gurney y Townshend (1983) para distinguir las nubes y sus sombras de otras cubiertas que pudieran tener un ND muy alto o muy bajo en las bandas visibles.

Pueden proponerse otros análisis basados en el contexto para realzar la clasificación temática. Por ejemplo, aplicando ciertos indicadores de idoneidad en función de la categoría contigua a cada píxel. Habitualmente, estos análisis se basan en matrices de idoneidad, que ponderan el interés de que una categoría se presente junto a otra para un determinado objetivo. Un campo interesante de aplicación es la cartografía de hábitats idóneos para ciertos animales (Congalton et al., 1993). La mezcla entre ciertas cubiertas vegetales complementa su dieta, haciendo esos lugares más atractivos para establecerse.

7.2.3.4.3. Redes Neuronales

Entre las nuevas técnicas de clasificación de imágenes, una de las que cuentan con más potencialidad es el empleo de redes neuronales (RN). En esencia, las RN se utilizan para predecir un cierto comportamiento complejo, habitualmente a partir de una muestra de entradas y salidas observadas. Con los datos de esa muestra, la red «aprende» a reconocer el resultado a partir de los valores de entrada, clasificando el resto de las observaciones de acuerdo a esas reglas.

Aunque la descripción completa de esta técnica rebasa el enfoque de este libro, nos parece conveniente dedicar unos párrafos a explicar los conceptos generales de las RN, así como su empleo en el contexto de la clasificación de imágenes.

Una RN está formada por un conjunto de elementos simples (neuronas, unidades de proceso), distribuidas en capas (fig. 7.41). Las unidades que forman una capa están conectadas con la capa o capas inmediatas. Esas uniones se expre-

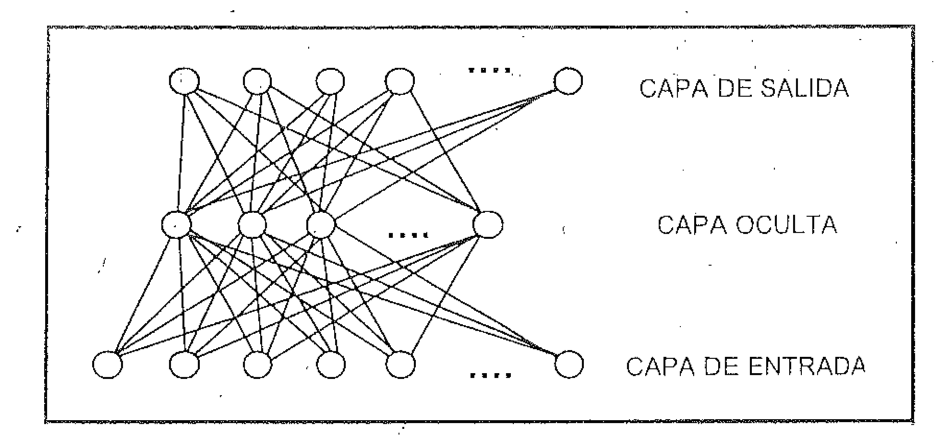


Fig. 7.41 - *Esquema de una red neuronal*

san como una serie de pesos ($w_{i,j}$), que se calculan de modo iterativo en el proceso de aprendizaje de la red. El objetivo de este proceso de aprendizaje es estimar unos resultados conocidos a partir de unos datos de entrada, para posteriormente calcular resultados desconocidos a partir del resto de datos de entrada. Esto se realiza a partir de todas las unidades que forman la red, variando el conjunto de los pesos en iteraciones sucesivas. Cada unidad de la red proporciona un valor de salida a partir de los valores de entrada, del modo siguiente (Richards, 1993):

$$o = f\,(w\ x + \theta) \qquad [7.56]$$

donde **o** indica el resultado, θ es un umbral (en muchas ocasiones se deja a cero), **w** un vector con los pesos que unen las distintas unidades de la red, y **x** el vector de entradas. Ese valor de salida puede ser a su vez la entrada de unidades situadas en la capa siguiente o en la anterior, dependiendo del tipo de red.

El número de unidades y de capas depende de las condiciones del problema en estudio, siendo más complicado el proceso de aprendizaje cuanto mayor dimensión tiene la red. En clasificación de imágenes es frecuente que las RN estén formadas por tres capas, denominadas de entrada, oculta y de salida. El objetivo de la capa oculta es lograr funciones que permitan discriminar observaciones de modo muy complejo. El número de las unidades de entrada está en relación con los valores que sirvan para entrenar a la red, habitualmente una por cada banda empleada en la clasificación, si bien es necesario utilizar una cadena de unidades por banda para poder codificar el rango completo de ND (0 a 255) (Bendiktsson et al., 1990). El número de unidades de salida coincide con el de clases que pretendan clasificarse, mientras el número en la capa oculta puede variar, aunque se recomienda sea al menos igual al de la capa de entrada (Richards, 1993).

El punto más álgido de las RN es el denominado «aprendizaje» de la red, esto es la adecuada configuración de las conexiones y pesos entre las unidades de la red para lograr un resultado óptimo. Entre los diversos criterios de aprendizaje, el más conocido es el denominado de retro-propagación. Tiene por objetivo encontrar un conjunto de pesos que asegure que cada vector de entrada producido por la red sea el mismo, o muy similar, al de salida conocido. Su formulación puede sintetizarse de la siguiente forma (para un análisis más detallado, véase Rumelhart et al., 1986 y Richards, 1993, pp. 207-224):

1. Asignar unos pesos arbitrarios a la red para obtener unos resultados a partir de los valores de entrada (en nuestro caso, los ND de las áreas de entrenamiento en las distintas bandas). Esos resultados se contrastan con la categoría a la que pertenece cada píxel de entrenamiento (introducida por el usuario). Esto permite obtener una tasa de error inicial. La medida habitual del error es la desviación cuadrática entre el resultado esperado (t_k) y el producido por la red (o_k):

$$E = \sqrt{\sum_{k=1,n} \sum_{m=1,c} (t_{k,m} - o_{k,m})^2} \qquad [7.57]$$

para todo resultado esperado **m** (en nuestro caso para las c categorías) en todas las unidades de entrada **k** (en nuestro caso las bandas, **n**, a introducir en la clasificación).

2. A partir de ahí, se van modificando iterativamente los pesos en las distintas capas, desde la de salida hasta la de entrada, con el objetivo de reducir el error global (se propaga el error hacia atrás, de ahí el nombre del ajuste), hasta que el error global sea muy pequeño o nulo (en ese caso todas las muestras introducidas en el aprendizaje estarían bien clasificadas). El número de iteraciones para lograr el objetivo marcado por el usuario (el nivel de convergencia de la red) puede ser muy elevado, dependiendo de la complejidad del problema (en clasificación de la cubierta del suelo, se han propuesto hasta 250.000 iteraciones: Civco, 1993).

Para ilustrar el proceso de aprendizaje, puede ser de interés estudiar un ejemplo de clasificación propuesto por Richards (1993, pp. 219-223). En ese caso se trata de un conjunto de seis elementos que forman dos categorías (c_1 y c_2) que tratan de discriminarse. Los valores de estos seis elementos son:

$$c_1 = (-4,3)\ (-4,-3)\ (-1,0)$$

$$c_2 = (-2,-3)\ (-2,3)\ (1,0)$$

Claramente se observa en la fig. 7.42 que estas dos clases no son separables por funciones lineales. Para abordar su clasificación, se establece una RN con tres capas: dos unidades de entrada, dos ocultas y una de salida, lo que implica seis

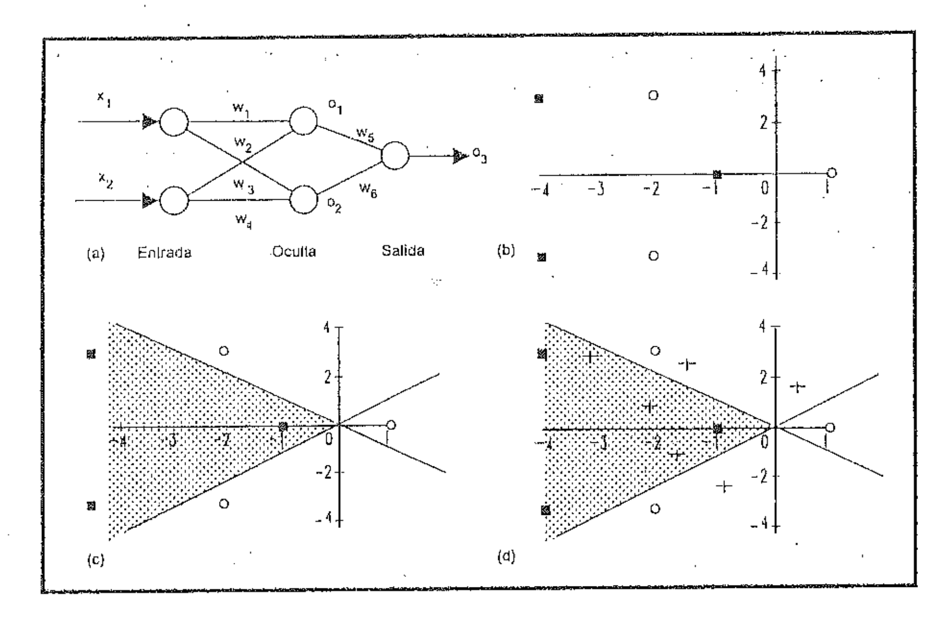


Fig. 7.42 - *Organización de la red neuronal para el problema del ejemplo (adaptado de Richards, 1993). (a) esquema de la red, (b) localización de los puntos muestrales, (c) líneas que definen la capa oculta y (d) clasificación de elementos tras el entrenamiento de la red.*

conexiones y, por tanto, calcular seis pesos y un umbral de error (θ). Siguiendo los criterios antes indicados se inicia el entrenamiento de la red con unos pesos arbitrarios, que dan lugar a un margen relativamente grande de error (0,461: tabla 7.8). Como puede observarse los pesos se modifican en cada iteración (aquí se ha resumido la tabla de resultados), así como el error residual, que va disminuyendo hasta un valor que consideramos adecuado. En ese momento, los pesos sirven para calcular las conexiones entre las unidades de la red:

– De la capa de entrada a la capa oculta:

$$o_1 = 2{,}901\ x_1 - 2{,}976\ x_2$$

$$o_2 = 2{,}902\ x_1 + 2{,}977\ x_2$$

– y de la capa oculta a la de resultados:

$$o_3 = 4{,}785\ o_1 + 4{,}784\ o_2$$

La asignación de una unidad de la muestra a una de las dos clases se hace en función de los resultados que ofrezca o_3. Como se trata sólo de dos categorías,

Iteración	w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6	Error
0	0,050	0,100	0,300	0,150	1,000	0,500	0,461
1	0,375	0,051	0,418	0,121	0,951	0,520	0,424
5	0,606	0,007	0,570	0,117	1,240	0,909	0,391
10	0,642	-0,072	0,641	0,196	1,464	1,034	0,378
50	2,224	-2,215	2,213	2,216	3,302	3,259	0,040
150	2,810	-2,834	2,810	2,835	4,529	4,527	0,007
250	2,901	-2,976	2,902	2,977	4,785	4,784	0,005

Tabla 7.8 - *Valores de los coeficientes de ponderación y del error en la red del ejemplo para distinto número de iteraciones*

la entrada se asigna a la clase 1 si el resultado o_3 está más cerca de 0, y a la 2 si está más cerca de 1.

Si igualamos a cero las dos primeras ecuaciones, resultan entre ambas un marco idóneo para separar las dos categorías de nuestro ejemplo (fig. 7.42c). Ahora bien, esas rectas pueden considerarse como un paso intermedio (están en la capa oculta) para obtener la ecuación final, en la cual se discriminan las dos categorías perfectamente con una función lineal. Simplificando las cosas, esas ecuaciones intermedias pueden concebirse como un medio de transformar el espacio de medida original para lograr una separación idónea entre los miembros de cada clase. Habitualmente, no se utilizan ecuaciones lineales para obtener los valores de salida de una neurona, sino funciones más complejas, como sigmoides (el valor de salida está comprendido entre 0 y 1), o hiperbólica-tangente (valor de salida de -1 a +1) (Civco, 1993).

Una vez realizado el aprendizaje, pueden introducirse nuevos casos de asignación desconocida, para que la RN los clasifique en función de las ponderaciones previamente calibradas. En este ejemplo, se añaden algunos casos en las proximidades de los inicialmente planteados; en todos ellos la asignación es correcta (fig. 7.42d). El proceso de clasificación se realiza simplemente asignando valores a las variables de entrada x_1 y x_2. Como ya hemos indicado, el valor de salida o_3 se redondea al entero más cercano para asignar el caso a la primera o segunda categoría.

En el contexto de la clasificación de imágenes se ha comprobado la potencialidad de las RN como alternativa a los clasificadores estadísticos tradicionales, especialmente cuando no pueden asumirse distribuciones normales de las categorías (Bendiktsson et al., 1990), ya que las RN son independientes del tipo de distribución. En varias ocasiones se ha contrastado su utilidad frente a estos clasificadores, lográndose resultados comparables o aún mejores. En general, la discriminación de las muestras de entrenamiento resulta más adecuada que con los clasificadores convencionales (Bendiktsson et al., 1990; Foody, 1995), pero la asignación propiamente de la imagen muestra una gran dependencia de la calidad del entrenamiento. Las RN pueden incluir bandas auxiliares no espectrales, que

pueden ser incluso nominales, como mapas de suelos o de propiedad de la tierra. En algunos trabajos se ha comprobado la gran robustez de esta técnica para incluir elementos texturales, ofreciendo así una clasificación con menos ruido que la basada en los métodos píxel a píxel convencionales (Hepner et al., 1990; Bischof et al., 1992; Civco, 1993). Finalmente, también se ha sugerido su aplicación a la estimación de parámetros físicos, como el índice de área foliar y el contenido de clorofila (Baret, 1995). El gran problema que plantean las RN es su lento y complejo proceso de aprendizaje, que desaconseja su empleo cuando el número de clases o de bandas es muy grande (Clark y Cañas, 1995).

Gracias a un módulo de RN incluido en el software XPACE, hemos incluido un ejemplo de clasificación con redes para la imagen de Arganda. En este caso, se utilizan tres programas para obtener la clasificación. En el primero, se crean las condiciones generales del análisis: número de unidades de entrada (6 en nuestro caso, una por banda), número de capas ocultas (1 en nuestro caso), número de clases de entrenamiento y valor temático de cada clase. En nuestro caso, se trata de las 8 categorías de cobertura previamente descritas. El siguiente programa se dedica a entrenar a la red a reconocer las categorías que quieren discriminarse. Existen algunos parámetros de control que modifican el proceso de aprendizaje, como el índice de momento, el índice de aprendizaje, el error máximo normalizado, el individual y el número máximo de iteraciones. Para nuestro caso, se aceptaron los valores recomendados por el programa: 0,9 para el momento; 0,1 para el aprendizaje; 0,01 para el máximo error; 0,001 para el máximo error individual, y 1000 iteraciones. Después de completar el número de iteraciones, el error máximo se situó en 0,0354. Aunque no garantizaba el indicado previamente, nos pareció suficiente para este ejemplo didáctico.

Tras entrenar a la red, el paso siguiente es asignar los píxeles de la imagen a cada categoría temática, conociendo los pesos obtenidos previamente. Los resultados pueden observarse en la figura 7.43*. La clasificación por RN fue más rápida que la realizada con el algoritmo de máxima probabilidad, descontando lógicamente el lento proceso de aprendizaje. Comparándola con las clasificaciones antes comentadas, se observa una peor discriminación de las áreas urbanas, que presentan una mayor confusión con zonas de graveras y espacios de vegetación herbácea y seca, a lo largo del río Jarama y Manzanares. Sin embargo, los matorrales, suelos descubiertos, láminas de agua, matorrales y cultivos de regadío están bastante bien delimitados.

7.2.3.4.4. Clasificación borrosa (*fuzzy classification*)

Previamente hemos señalado el interés de las técnicas que permiten obtener información sobre la mezcla en el interior de un píxel (cap. 7.1.6). Considerar un píxel como un compuesto de varios elementos resulta cada vez más común, si

se considera el espacio como un continuo, sin barreras muy precisas, al menos en lo que se refiere a la mayor parte de las variables ambientales.

En el campo de la clasificación este enfoque resulta problemático, ya que los métodos de asignación antes estudiados consideran sólo una categoría potencial para cada píxel. Por ejemplo, en el criterio de máxima probabilidad, un píxel se asigna a la clase más probable, independientemente de que la probabilidad de pertenencia a esa categoría sea muy superior a pertenecer al resto (digamos que 0,9 sobre 0,1) o sólo la supere por un estrecho margen (0,55 frente a 0,45). En el primer caso, el error de clasificar ese píxel es bastante bajo, mientras en el segundo la asignación es muy arriesgada.

Las nuevas técnicas de clasificación borrosa (*fuzzy*) permiten solventar este problema. En pocas palabras, se considera una pertenencia borrosa a una categoría cuando se admite un grado de pertenencia. Por tanto, cada píxel se etiqueta en varias categorías, con un valor más o menos alto en función de su similitud espectral (fig. 7.44). Convencionalmente, la función de pertenencia corresponde a una distribución binaria (0 no pertenece, 1 pertenece), pero puede concebirse un función de pertenencia comprendida entre 0 y 1, lo que permitiría una asignación simultánea a varias categorías, con diferentes grados de pertenencia (Wang, 1990):

$$U_{i,x} = f(ND_x) \qquad [7.58]$$

donde $U_{i,j}$ indicaría el grado de pertenencia del píxel **x** a la clase **i**, y puede ser un número real comprendido entre 0 y 1.

En aplicaciones de teledetección, los métodos más habituales para obtener esos valores de pertenencia son la variante borrosa de máxima probabilidad

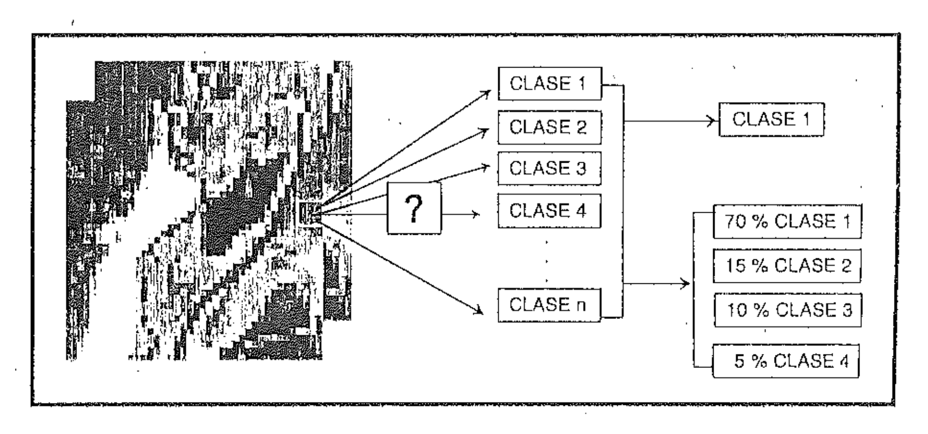


Fig. 7.44 - *La clasificación convencional asigna cada píxel a una sola clase, mientras la borrosa acepta asignaciones múltiples*

(Wang, 1990; Maselli et al., 1995) y una variedad de análisis no supervisado, denominado c-medias borrosas (Fisher y Pathirana, 1990; Foody, 1992). Por simplificar la exposición, nos vamos a centrar en el primer criterio, ya que es muy similar al de máxima probabilidad antes analizado. En el trabajo de Fisher y Pathirana (1990) se incluye la formulación completa del criterio c-medias borrosas.

En un enfoque de lógica borrosa, para calcular el grado de pertenencia de un píxel a las distintas categorías de la leyenda, asumiendo una distribución de probabilidad normal en las categorías, podemos emplear las siguientes definiciones del vector de medias y la matriz de varianza-covarianza (Wang, 1990):

$$M^*_A = \frac{\sum_{i=1,n} U_A(M_i) M_i}{\sum_{i=1,n} U_A(M_i)} \qquad [7.59]$$

y

$$V^*_A = \frac{\sum_{i=1,n} U_A(M_i)(M_i - M^*_A)(M_i - M^*_A)^T}{\sum_{i=1,n} U_A(M_i)} \qquad [7.60]$$

donde U_A indica el grado de pertenencia a la clase A, M el vector de ND formado por los n píxeles utilizados en la muestra, y V_A la matriz de varianza-covarianza para esa clase. El asterisco en el vector M_A y la matriz V_A indican que se trata de medias y varianza-covarianza para un espacio borroso (*fuzzy*).

A partir de esos dos valores, puede calcularse la probabilidad de pertenencia a ese espacio, variando ligeramente las fórmulas de la probabilidad bayesiana [7.53]:

$$p^*(x/A) = (2\pi)^{-m/2} |V^*_A|^{-0,5} \exp\{-0,5\,(M_x - M^*_A)^T\, V^{*\,-1}_A\, (M_x - M^*_A)\} \qquad [7.61]$$

El resultado de este cálculo permite conocer la probabilidad de incluirse en cada categoría A. Esa probabilidad se considera el grado de pertenencia de ese píxel a dicha categoría. Por tanto, se obtienen tantas imágenes clasificadas como categorías se consideren. El ND de cada una de esas imágenes indica el grado de pertenencia a las distintas categorías.

Las áreas para estimar las estadísticas de entrenamiento pueden ser homogéneas —como en la clasificación convencional— o, ahí la novedad, heterogéneas, con componentes mixtos, siempre que se conozca su grado de mezcla. Las aplicaciones de esta lógica borrosa son de especial interés cuando se pretenda analizar coberturas con alto grado de mezcla, como es el caso de las categorías urbanas o cuando se aborden inventarios de vegetación. En varios trabajos se ha obtenido una buena correlación entre el grado de cobertura de distintas clases,

observado en fotografía aérea de alta resolución, y los grados de pertenencia ofrecidos por la clasificación borrosa, tanto para clases urbanas (Fisher y Pathirana, 1990), como para densidades de vegetación (Foody, 1992). Un interesante campo de aplicación es el inventario forestal, donde este tipo de clasificación puede facilitar datos de gran interés para la estimación global de densidades y superficies. En un trabajo piloto realizado en Italia, los ajustes entre las observaciones de terreno y los componentes *fuzzy* son mucho más altos que para las bandas originales (reducidas mediante componentes principales), especialmente en la estimación del área basal (Maselli et al., 1995).

Aunque en el origen esta técnica procede de una concepción absolutamente distinta al análisis lineal de mezclas espectrales (ALME) previamente analizado, los resultados que ofrecen tienen bastante en común. Ambas técnicas pretenden derivar información sub-píxel, expresando el grado de pertenencia (*fuzzy*) o la proporción (ALME) de una determinada categoría. Son pocos los trabajos que han comparado las ventajas e inconvenientes de ambas técnicas, en cuanto a eficacia para resolver las mezclas, tiempo de cálculo y limitaciones. Cuando se han abordado simultáneamente, los resultados parecen ofrecer una gran coincidencia entre los dos métodos (Foody y Cox, 1994).

En la figura 7.45 aparece un ejemplo de clasificación utilizando un algoritmo no supervisado de k-medias borrosas incluido en el programa XPACE (PCI, 1994). Se introdujo un valor intermedio, entre los recomendados por el programa, para los parámetros de control del agrupamiento (normalización de las medias borrosas y distancia entre las mismas). Se señaló un máximo de 9 grupos, 30 iteraciones y un 0,01 para el porcentaje de píxeles que podían cambiar de grupo entre iteración. Puesto que se trata de un proceso bastante lento, se seleccionaron para el análisis únicamente las bandas 3, 4 y 5. La figura recoge los grados de pertenencia de los píxeles de la imagen a cuatro de las categorías temáticas previamente indicadas. En este caso sólo se han discriminado tres niveles de pertenencia, por lo que la imagen resultado aparece un tanto simplificada.

7.2.3.4.5. Empleo de información auxiliar

El empleo del ordenador electrónico como instrumento de depósito y proceso de la información espacial, ha provocado una creciente tendencia a la integración, a combinar distintas variables sobre el mismo territorio con vistas a una evaluación integrada del paisaje. Más adelante repasaremos esta tendencia en el contexto de los Sistemas de Información Geográfica (capítulo 9), en donde la teledetección espacial tiene su continuidad más lógica. Aquí nos interesa recalcar el interés de contar con información auxiliar con vistas exclusivamente a mejorar los resultados de la clasificación.

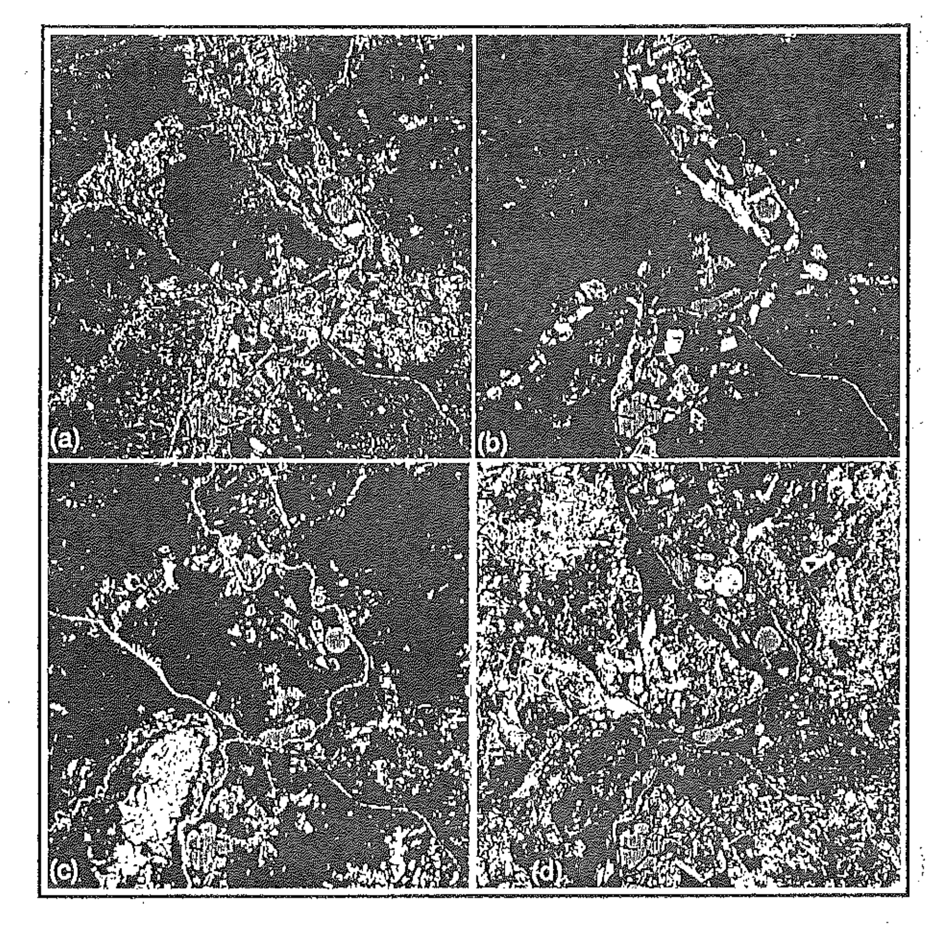


Fig. 7.45 - *Clasificación de la imagen de Arganda con técnicas borrosas. Se presenta los grados de pertenencia correspondientes a las categorías urbano (a), cultivos de regadío (b), matorral (c) y pastizales (d).*

Como se comentó anteriormente, en ocasiones resulta muy compleja la asignación de los píxeles de la imagen sobre la única información de sus ND. Ya hemos visto la posibilidad de incorporar información sobre las relaciones espaciales entre los píxeles que forman la imagen. Más tarde, veremos también la posibilidad de acudir a imágenes de otras fechas, con lo que se completaría la información espectral con una dimensión temporal. Finalmente, otra alternativa pasa por emplear datos de distintas fuentes, no necesariamente adquiridos por sensores espaciales. Por ejemplo, para clasificar olivares y viñedo resulta conveniente contar con información sobre el tipo de suelos en que se asientan, pues éstos serán un elemento clave en la señal detectada por el sensor. En el caso de las coníferas, su situación topográfica puede ser crucial para distinguir distintas especies, difícilmente discriminables sólo sobre la información espectral que proporciona el sensor.

A juicio de Hutchinson (1982), la información auxiliar puede beneficiar a la clasificación en varias formas:

(i) Para estratificar la imagen, previamente a la clasificación, de acuerdo a rasgos fisiográficos homogéneos. Esto permite reducir la varianza espectral de las distintas categorías que pretenden discriminarse (Arbiol et al., 1985; Núñez et al., 1983).

(ii) Para introducir nuevas variables en la clasificación, combinando las bandas originales, con modelos digitales de elevación o cartografía convencional digitizada (Strahler y Logan, 1978; Cosentino et al., 1981; Bendiktsson et al., 1990; Pons y Solé-Sugrañes, 1994; Salas y Chuvieco, 1995).

(iii) Para re-clasificar algunas categorías en caso de que no sean discriminables solo a partir de información espectral (Hutchinson, 1982; Skidmore, 1989; Middelkoop y Janssen, 1991).[7]

Entre los trabajos pioneros en esta integración de datos, se encuentra el método para la realización de inventarios forestales que desarrollaron varios profesores de la Universidad de California, Santa Barbara (Strahler y Logan, 1978; Franklin et al., 1986). Este método, aplicado a varios bosques de California, combinaba el tratamiento digital de imágenes Landsat con modelos digitales de elevación e información de campo. A partir de las imágenes se elaboraron algunos índices de textura, incorporados a la clasificación junto a las bandas originales. Asimismo, se empleó un modelo digital de elevación, sobre el que se obtuvo la altitud, pendiente y orientación, lo que permitió refinar notablemente la discriminación tanto de especies, como de densidades y alturas. Trabajos similares se han desarrollado por otros autores en el inventario forestal (Miller y Williams, 1978; Wu, 1980), y en la cartografía de modelos combustibles (Castro y Chuvieco, 1995; Salas y Chuvieco, 1995). Estos enfoques integrados permiten abordar clasificaciones mucho más ricas, ya que se combinan criterios espectrales (propiedades ópticas de las especies), espaciales (densidades) y temporales (productividad neta), ofreciendo una evaluación ecológica del territorio en estudio.

En el capítulo 9 veremos, con mayor detalle, algunos ejemplos de este análisis combinado entre la teledetección y los S.I.G.

[7] A ello habría que añadir las correcciones previas de la imagen que requieren, como ya hemos visto, modelos digitales de elevación, tanto para eliminar el efecto de iluminación (cap. 7.1.2), como para posicionar correctamente los píxeles en el terreno (cap. 6.5).

7.2.4. Obtención y presentación de resultados

Independientemente del método empleado en la clasificación digital, los resultados se almacenan en una nueva imagen, similar a las originales, en cuanto a estructura y tamaño, pero con la importante diferencia de que el ND de cada píxel no corresponde a un valor de reflectividad, sino a la categoría a la que se asignó. En definitiva, obtenemos una nueva matriz numérica, similar a la original aunque de dos dimensiones, pues se ha condensado la información espectral (varias bandas) en una sola clase temática. Esa nueva imagen puede ser el producto final del trabajo, o servir como estadio intermedio de un proyecto más amplio, en donde la teledetección se combine con otro tipo de variables espaciales.

Esa nueva imagen puede dar lugar a dos tipos de productos: cartográficos y estadísticos. En el primer caso, se trata de convertir la imagen clasificada en un mapa; en el segundo, de realizar un inventario a partir de los ND que componen esa imagen.

7.2.4.1. Productos cartográficos

La imagen clasificada puede convertirse en un mapa temático, similar a los convencionales, empleando algunas técnicas ya comentadas en anteriores capítulos.

En primer lugar, conviene simplificar los resultados de la clasificación aplicando algún filtro modal, de tal forma que se generalicen los polígonos que forman la clasificación. Esto facilita también su conexión con un S.I.G.

Seguidamente, se requiere dotar a esa imagen de una validez cartográfica, de tal forma que se ajuste a un sistema de coordenadas determinado. Por cuanto el resultado de la clasificación es también una imagen digital, pueden aplicarse sobre ella los métodos de corrección geométrica antes comentados (6.5.3). Basta identificar puntos comunes entre la imagen y el mapa de referencia, aplicar algún polinomio de transformación, y proceder al trasvase de los ND a su nueva posición. Conviene recordar que este trasvase debe realizarse con el criterio del vecino más próximo, puesto que cualquier otro —que implique promediar las categorías— invalidará los resultados de la clasificación. Obvia decir que los puntos de control pueden localizarse sobre las bandas originales, ya que tienen la misma geometría de las clasificadas, y aplicar luego sobre éstas el modelo de corrección. Localizar puntos sobre una imagen clasificada sería muy problemático, ya que se pierden la mayor parte de los rasgos lineales de la imagen original.

Una vez posicionada correctamente, la imagen clasificada requiere contar con una serie de elementos gráficos, que faciliten su lectura. Uno importante es generar una tabla de color apropiada al significado temático de cada una de las

categorías. En este sentido, conviene respetar las convenciones establecidas en la asignación temática de colores: por ejemplo, rojo para las zonas urbanas, verde para las forestales, ocre para las agrícolas, etc. (Anderson et al., 1976; Coleman, 1968), en lugar de atribuir colores arbitrarios a las categorías.

Como ya se comentó, la manipulación numérica del color ofrece al intérprete una amplia paleta de colores: de 0 a 255 niveles, por cada uno de los tres cañones de color. De esta forma, para diseñar un color apropiado a cada categoría, basta indicar tres valores numéricos, entre 0 y 255, que expresen el nivel de rojo, verde y azul, asignado a dicha clase. En clasificaciones temáticas, quince o veinte colores, bien discriminables entre sí, serán suficientes para visualizar el resultado. Un mayor número de categorías complicaría notablemente la interpretación y, en consecuencia, la legibilidad del documento final.

En la representación visual de las imágenes clasificadas que venimos comentando, se han empleado los colores recogidos en la paleta estándar del sistema. Para el caso de la clasificación supervisada, los colores seleccionados aparecen en la tabla 7.9.

Basta añadir al mapa un conjunto gráfico apropiado para que se culmine el proceso de edición, sin mediar la delineación humana. Elementos de interés, en este sentido son: una leyenda de color, que identifique las categorías presentes en el mapa y el color que se les asigna; una escala gráfica, para identificar adecuadamente la proporción del área representada, y una serie de rótulos identificativos de la zona y/o del proceso realizado. Caso de que se disponga de información vectorial complementaria, como carreteras o ríos, puede ser conveniente superponerlos a la imagen como líneas de referencia.

Una vez que el resultado es satisfactorio, el último paso se dirige hacia la reproducción de la imagen clasificada en un soporte permanente, ya sea papel o

Clase	Rojo	Verde	Azul	Color
agua	0	0	255	Azul claro
regadío	0	255	0	Verde claro
suelo	255	255	0	Amarillo
pastizal	255	180	0	Naranja
matorral	150	75	0	Marrón
pinar	0	125	0	Verde medio
urbano	255	0	0	Rojo
residencial	255	0	255	Magenta

Tabla 7.9 - *Tabla de color utilizada para la clasificación de la imagen de Arganda (figura 7.37*)*

película. En el epígrafe dedicado a los componentes físicos del tratamiento de imágenes (6.3.1.3), se hizo referencia a los distintos medios para obtener esta salida gráfica. En función de las disponibilidades de equipo, puede obtenerse un resultado de gran calidad, que haga prácticamente innecesarios los medios convencionales en la reproducción del documento. Desde las fotografías de pantalla y el empleo de impresoras de inyección de tinta hasta los restituidores láser, el rango de opciones es muy amplio. Actualmente, el coste y accesibilidad de los periféricos gráficos de alta resolución ha disminuido considerablemente. Para evitar problemas de formato, resulta conveniente comprobar que nuestro sistema de tratamiento de imágenes disponga, o bien del programa para gestionar ese periférico concreto (lo que técnicamente se conoce como controlador o *driver*), o al menos las capacidades de exportar el archivo generado a un formato reconocible por otro programa que sí lo controle (por ejemplo, el formato gráfico .TIF, bastante extendido para imágenes *raster*). Afortunadamente, con el empleo de los entornos gráficos estándar (como las distintas variantes de Windows), este problema se reduce notablemente, ya que habitualmente los programas son capaces de reconocer cualquier periférico soportado por el propio entorno gráfico. En consecuencia, basta asegurarse que nuestro periférico sea accesible al entorno gráfico para que pueda reconocerse por cualquier aplicación.

7.2.4.2. Productos estadísticos

El inventario superficial de los resultados es una de las principales ventajas de la clasificación digital. Una simple tabulación de frecuencias permite obtener el inventario del área clasificada; esto es, el número de píxeles incluidos en cada una de las categorías. Puesto que es conocida la dimensión superficial de cada píxel, resulta inmediato obtener la extensión ocupada por cada categoría. Por el contrario, el análisis visual requiere, para alcanzar el mismo objetivo, planimetrar cada una de las zonas delimitadas por el intérprete, lo que resulta una labor lenta, fatigosa y, frecuentemente, inexacta.

En el caso del tratamiento digital, este cómputo de frecuencias puede realizarse sobre toda la imagen, o sobre polígonos determinados. Si esos polígonos coinciden con unidades administrativas (municipios, comarcas), puede obtenerse un inventario de gran interés para las estadísticas oficiales. Por ejemplo, una clasificación agronómica de la imagen puede facilitar estadísticas de cultivo a veces inaccesibles por medios convencionales. Varios trabajos han ensayado el uso alternativo de esta metodología frente a las fuentes de información tradicionales, como el catastro o las hojas de cultivos (GDTA-CEE, 1982).

A modo de ejemplo, la tabla 7.10 recoge el inventario de los tipos de ocupación de la imagen de Arganda, tal y como aparecen clasificados en la figura 7.37*. Como vemos, el pastizal muestra una clara dominancia (54,47 %), a conse-

Clase	Píxeles	Hectáreas	Porcentaje
agua	2966	266,94	1,84
regadío	6045	544,05	3,75
suelo	6550	589,5	4,06
pastizal	87813	7903,17	54,47
matorral	26696	2402,64	16,56
pinar	7118	640,62	4,42
urbano	13482	1213,38	8,36
residencial	10532	947,88	6,53
total	161202	14508,18	100

Tabla 7.10 - *Inventario de la ocupación del suelo en la imagen de Madrid*

cuencia de que incluye tanto el pastizal propiamente dicho como las zonas de rastrojera (puesto que el cultivo de secano estaba ya recogido en la fecha de adquisición de la imagen), o las parcelas abandonadas en espera de su urbanización. El matorral es la segunda clase en extensión, con un 16,56 % del área, seguidas de las zonas urbanas, aunque aquí se observa una asignación excesiva en detrimento de los suelos descubiertos o del matorral.

7.3. Técnicas de análisis multitemporal

7.3.1. El factor tiempo en los estudios de teledetección espacial

Una de las aportaciones más destacadas de la teledetección espacial al estudio del medio ambiente es su capacidad para seguir procesos dinámicos. Al tratarse de información adquirida por un sensor situado en una órbita estable y repetitiva, las imágenes de satélite constituyen una fuente valiosísima para estudiar los cambios que se producen en la superficie terrestre, ya sean debidos al ciclo estacional de las cubiertas, ya a catástrofes naturales o a alteraciones de origen humano. La cadencia máxima de observación depende de la resolución temporal del sensor —aunque en términos prácticos ese período se amplía si consideramos la cobertura nubosa o posibles problemas del sensor—, variando con los sistemas disponibles entre 30 minutos para los satélites geo-estacionarios y varias semanas para los de recursos naturales de órbita polar. En consecuencia, la frecuencia de observación puede adaptarse al estudio de problemas muy diversos, desde la dinámica atmosférica, que requiere una observación continua, hasta los cambios urbanos o agrícolas, que sólo precisan actualización en el orden de varios meses o años (tabla 7.11). Si en los primeros años de la teledetección, la resolución espacial del sensor se consideraba el elemento más crítico para valorar su potencialidad, la

Actualización de fronteras censales	5-10 años
Dinámica urbana	5-7 años
Areas con problemas medioambientales	2-5 años
Cálculos de población	10-20 años
Actualización de mapas topográficos	10-20 años
Actualización de mapas de cobertura	3-5 años

Tabla 7.11 - *Cadencia de actualización para estudios multitemporales (adaptado de Jensen et al., 1983)*

cobertura temporal cada vez se califica como un criterio más protagonista, al subrayarse la necesidad de contar con información suficientemente actualizada. Por ejemplo, para evaluar las condiciones vegetales a corto plazo, de cara a predecir el rendimiento de un cultivo o el peligro de incendios —por poner dos ejemplos de gran interés en nuestro país—, de nada serviría una alta precisión espacial sin el adecuado ciclo de cobertura. Un fino detalle espacial no es suficiente para estimar operativamente el riesgo de incendio si sólo contamos con una imagen cada 16 días. Será preferible, en este contexto, emplear imágenes menos detalladas, siempre que proporcionen información más frecuente.

Para que puedan abordarse estudios multitemporales con teledetección es preciso que el sistema sensor proporcione una cobertura periódica, en las mismas bandas espectrales, y con condiciones de observación similares (altura, hora, ángulo de adquisición). Estos requisitos los cumplen la mayor parte de los satélites de recursos naturales, excepción hecha de los instalados sobre el *Space Shuttle* que no ofrecen una cadencia y homogeneidad adecuada, si bien permiten comparaciones visuales-cualitativas de gran interés. Éste es también el caso de los sensores aerotransportados, singularmente de la fotografía aérea, que se ha utilizado profusamente para analizar la dinámica de la cobertura del suelo (Martínez-Vega, 1989).

Como ya vimos en el capítulo 5, la dimensión temporal puede considerarse en teledetección con un doble objetivo: multiestacional y multianual. En el primer caso, la dimensión temporal sirve para refinar la discriminación de algunas categorías, que pueden no ser separables espectralmente, pero sí atendiendo a su variedad fenológica. Con este objetivo, se seleccionan imágenes adquiridas en distintas estaciones, de acuerdo al calendario estacional de esas cubiertas. Habitualmente, se combinan las bandas de todas las imágenes en un sólo archivo, de tal manera que se enriquezca la clasificación espectral incorporando un componente temporal (Lo et al., 1986). También hay ejemplos de comparación entre clasificaciones realizadas para distintas estaciones, comparando las categorías que en cada una se pueden separar (Schriever y Congalton, 1995). Los resultados suelen mejorar notablemente la clasificación mono-temporal (Berg y Galli, 1980; Girard, 1981; Mergerson, 1981), si bien es preciso ajustar muy bien las imágenes

geométricamente para evitar confusiones en los perfiles temporales generados, ya que la asignación se realiza píxel a píxel (Lo et al., 1986).

El segundo enfoque, que hemos denominado análisis multianual, tiene por objetivo detectar los cambios producidos entre dos o más fechas, para lo que suele partirse de imágenes adquiridas en distintos años, que se comparan visual o digitalmente (Sader y Winne, 1992; Lucas et al., 1993). En este caso, por contraposición al enfoque multiestacional, se procura que las imágenes sean de la misma época del año, con objeto de aislar más fácilmente lo que las imágenes manifiestan de cambios en el terreno. Con este objetivo, el análisis multianual requiere una homogeneización radiométrica y geométrica de las imágenes para minimizar la influencia de la atmósfera, las condiciones del sensor, o la geometría de iluminación.

A lo largo de este capítulo, nos vamos a centrar principalmente en las técnicas de detección de cambios, aunque algunos aspectos son aplicables igualmente al análisis multiestacional. Para ilustrar el proceso de análisis, vamos a incorporar a este capítulo un conjunto de tres imágenes adquiridas por el sensor Landsat-TM en julio y agosto de 1991 y noviembre de 1992 (fig. 7.46). Corresponde a una miniescena de este sensor (un área inicial de 50 x 50 km) centrada sobre la Hoya de Buñol (Valencia). El objetivo de esta secuencia multitemporal era evaluar los efectos de un gran incendio que afectó esta zona en el verano de 1991. Las imágenes corresponden a las condiciones previas al incendio, inmediatamente posteriores y un año posteriores, en este caso para estudiar las condiciones de la regeneración[8].

7.3.2. Requisitos previos para el análisis multitemporal

Como hemos indicado, las técnicas de detección de cambios se dirigen a detectar las modificaciones que ha experimentado un determinado territorio, como consecuencia de un fenómeno natural o de origen antrópico. La evaluación de los efectos de una erupción volcánica, un incendio forestal o una inundación se incluyen en este ámbito, así como el seguimiento de otros procesos más graduales, como sería el crecimiento urbano o la dinámica de cultivos.

La cadencia en el seguimiento de estos procesos depende principalmente de su dinamismo. La evaluación de los efectos de un incendio o erupción volcánica requieren un período corto de tiempo, con objeto de paliar sus consecuencias más negativas; los cambios agrícolas precisan una estimación anual, mientras los urbanos pueden hacerse cada cinco o diez años.

[8] Una información más detallada sobre este incendio puede encontrarse en Viedma y Chuvieco (1993) y Martín et al. (1994a).



Fig. 7.46 - *Imágenes del NDVI correspondientes al área de Buñol: en la parte superior, antes del incendio; en el centro, poco después del fuego; en la parte inferior, un año después del incendio.*

En la mayor parte de los casos, la detección de cambios se realiza comparando, píxel a píxel, los ND de las distintas imágenes. En consecuencia, es necesario eliminar previamente cualquier cambio en los ND de la escena que no sea debido a cambios reales en la cubierta. Esto implica ajustar con precisión, tanto radiométrica, como geométricamente, las imágenes que intervienen en el análisis.

7.3.2.1. Corrección geométrica

Para abordar la detección digital de cambios es preciso que las imágenes se ajusten con gran nivel de detalle, ya que de otro modo estaríamos detectando como transformaciones lo que sería sólo fruto de una falta de ajuste entre imágenes (Hord, 1982). El efecto puede llegar a ser muy grave, especialmente cuando se trata de detectar categorías con una gran variabilidad espacial, como es el caso de las urbanas (Gordon, 1980), dependiendo también de la resolución espacial del sensor (Nelson y Grebowsky, 1982). En un reciente ensayo, se ha simulado el efecto de un incorrecto ajuste entre imágenes en los resultados del análisis multitemporal. Los resultados obtenidos concluyen que, para sensores de baja resolución espacial como el AVHRR, cuando el ajuste entre imágenes supera un píxel de error, hasta el 50 % del cambio observado entre ellas puede ser debido a ese desajuste. Además, según estos autores, se requieren precisiones de ajuste superiores a 0,2 píxeles para reducir ese efecto por debajo del 10 % (Townshend et al., 1992).

Como ya indicamos en el capítulo 6.5, la mayor parte de las imágenes basan el ajuste geométrico en la localización de una serie de puntos de control imagen-mapa. Para el análisis multitemporal, los puntos se toman entre imágenes, eligiendo una como referencia. En este caso, el proceso de seleccionar puntos comunes resulta más sencillo, ya que son muchos más los rasgos comunes entre dos imágenes, que entre una imagen y un mapa. Para dos imágenes pueden emplearse formas características de la vegetación, del trazado parcelario o la hidrografía, visibles entre imágenes, pero que habitualmente no son localizables en el mapa.

También para el análisis multitemporal resulta de interés el proceso de selección semi-automática de puntos de control. A partir de ventanas móviles en torno a cada punto localizado en la imagen de referencia, el punto en la homóloga se obtiene por correlación entre los ND de las dos imágenes (Ortí et al., 1979).

7.3.2.2. Homogeneización radiométrica

Otro importante problema en la detección de cambios es el producido por las variables condiciones de observación, situaciones atmosféricas o condiciones de calibración del sensor. Estos efectos modifican la signatura espectral de un píxel, aunque se mantenga constante la cubierta. En consecuencia, es preciso homo-

geneizar los ND de las imágenes que intervienen en el análisis. Para ello, puede optarse por un doble enfoque:

(i) calibrar los ND de modo absoluto, convirtiéndolos a medidas de reflectividad o temperatura del suelo, o

(ii) equiparar los ND entre imágenes.

En el primer caso, es preciso acudir a los modelos de conversión que hemos visto previamente (7.1.2), incorporando los parámetros de corrección atmosférica más refinados. En el segundo enfoque basta una corrección relativa entre fechas, ya que no se trata de evaluar el efecto atmosférico *per se*, sino de evitar que distorsione las comparaciones. Con esta óptica, los métodos de corrección propuestos se basan en situar una serie de píxeles de radiancia constante entre fechas, preferiblemente que recojan áreas de baja reflectividad (sombras, aguas claras y profundas) y alta reflectividad (suelos descubiertos, estacionamientos, pistas de aterrizaje). A partir de los ND de esos píxeles, pueden estimarse unos coeficientes de sesgo y ganancia, para cada banda, que permitan corresponder los ND entre fechas distintas. El método se ensayó con buenos resultados en un estudio multitemporal sobre la Albufera de Valencia (Caselles y López, 1989), comparándolo con modelos atmosféricos estándar (Tanré et al., 1986). La viabilidad de estas correcciones para homogeneizar las condiciones atmosféricas entre imágenes también se ha demostrado en el marco de la estimación de cosechas (Hill y Sturm, 1991) y en el inventario forestal (Coppin y Bauer, 1994), facilitando ajustes con una correlación superior a 0,98 (Hall et al., 1991a; Coppin y Bauer, 1994).

Puesto que la variación temporal entre píxeles puede alterar esos coeficientes de regresión, otros autores han propuesto utilizar los ND más oscuros y más claros entre fechas, obtenidos a partir de los componentes de brillo y verdor de la transformación *tasseled cap* (ver cap.7.1.5):

$$ND_{c,k} = s_k\, ND_k + g_k \qquad [7.62]$$

esto es el ND corregido en la banda k se estimaría a partir de unos coeficientes de sesgo y ganancia para esa banda, que se obtienen a partir de:

$$s_k = (ND_{cl,r,k} - ND_{os,r,k}) / (ND_{cl,c,k} - ND_{os,c,k}) \qquad [7.63]$$

y

$$g_k = (ND_{os,r,k}\, ND_{cl,c,k} - ND_{os,c,k}\, ND_{cl,r,k}) \,/\, (ND_{cl,c,k} - ND_{os,r,k}) \qquad [7.64]$$

donde $ND_{os,r,k}$ y $ND_{cl,r,k}$ indican el ND medio de los píxeles más oscuros y más claros, respectivamente, de la imagen de referencia, y $ND_{os,c,k}$ y $ND_{cl,c,k}$ lo mismo

en la imagen a corregir. El método se comprobó muy sólido para homogeneizar el efecto atmosférico entre imágenes para un estudio multitemporal. Caso de que la imagen de referencia se hubiera corregido atmosféricamente, el método también sirve para eliminar el aporte atmosférico en las imágenes de otras fechas, obteniendo coeficientes de correlación muy adecuados con correcciones atmosféricas de precisión (Hall et al., 1991a).

Otros autores proponen, en ausencia de superficies invariantes entre fechas, utilizar aquéllos que cuenten con NDVI más bajos y más altos (Hill y Sturm, 1991).

7.3.3. Técnicas para la detección de cambios

En los últimos años han proliferado notablemente los estudios de detección de cambios, aplicándose a una gran variedad de disciplinas (Mouat et al., 1993). Intentando resumir estos trabajos, podemos presentar las técnicas empleadas en dos grandes capítulos, según utilicen imágenes continuas o categorizadas (Eastman et al., 1994). En el primer caso, se emplean técnicas cuantitativas: diferencias, regresión, componentes principales, etc., mientras en el segundo se comparan imágenes previamente clasificadas, mediante tablas de contingencia.

A continuación, vamos a repasar las distintas técnicas de detección, dividiendo la exposición entre las cuantitativas y las categóricas[9]. Finalmente, incluiremos un epígrafe sobre análisis de series multitemporales de imágenes.

7.3.3.1. Composiciones multitemporales

Esta técnica de detección se basa en comparar visualmente los tonos de gris o color que ofrecen dos o más imágenes de distinta fecha. Habitualmente, se aplican previamente algunas técnicas de realce del color o transformaciones, como índices de vegetación o componentes principales. Posteriormente, se realizan composiciones multitemporales en color con esas bandas (Sader y Winne, 1992). Una muy común es aplicar el cañón rojo a la primera fecha y el verde a la segunda, dejando el azul vacío. En tonos amarillo aparecerán las áreas estables, en rojos las zonas que hayan reducido su ND entre fechas y en verde las que lo hayan ganado. El método resulta bastante sencillo y tiene la ventaja de incorporar el conocimiento

[9] Una revisión global sobre técnicas de detección de cambios puede estudiarse en: Jensen (1996, cap. 9), Eastman et al. (1994) y en varios artículos de referencia (Jensen, 1981; Lo et al., 1986; Singh, 1986; Mouat et al., 1993).

y los criterios de análisis del intérprete, lo que resulta muy ventajoso en categorías urbanas (Martin, 1989). En la figura 7.47* aparece un ejemplo de estas composiciones multitemporales sobre el incendio de Buñol. Hemos utilizado los índices de vegetación anteriores al incendio (en rojo), y posteriores (en verde y azul). En consecuencia, las zonas afectadas por el fuego se muestran en color rojo, ya que tienen menor contenido de verde y azul que de rojo (como consecuencia de la pérdida de vigor vegetal por el incendio), mientras las zonas que no han cambiado se muestran en tonalidades de gris.

7.3.3.2. Diferencia entre imágenes

Una simple resta entre las imágenes de dos fechas, previamente homogeneizadas radiométrica y geométricamente, permite discriminar aquellas zonas que han experimentado cambios entre esas fechas. Las zonas estables presentarán un valor cercano a cero, mientras las que hayan experimentado cambios ofrecerán valores significativamente distintos a cero (positivos o negativos). Si el equipo de tratamiento digital no permite visualizar valores negativos, conviene añadir al cálculo una constante para evitar éstos. En resumen:

$$ND_c = ND_{t2} - ND_{t1} + C \qquad [7.65]$$

donde ND_c indica el ND correspondiente a la imagen de cambios, ND_{t1} y ND_{t2} los correspondientes a las imágenes del primer y segundo período, respectivamente, y C es una constante para evitar valores negativos (habitualmente 127).

Como fruto de este cálculo se obtiene una imagen de cambios, que presentará tonos oscuros para las zonas que hayan reducido su ND, los más claros para aquéllas que hayan ganado y los intermedios para las zonas estables. El cálculo puede realizarse sobre los ND de alguna de las bandas originales (en ocasiones se ha utilizado la banda roja: Pilon et al., 1988), aunque es más frecuente aplicar esta operación sobre índices de vegetación. En este caso, el valor de la diferencia nos permite señalar las zonas que han perdido o ganado vigor vegetal (Viedma et al., 1993; Coppin y Bauer, 1994). El histograma de esa imagen de cambios suele revelar un perfil gausiano, con las máximas frecuencias para las zonas estables (en el centro del histograma) y las dinámicas ocupando las colas de la distribución (fig. 7.48)

La figura 7.49a incluye una imagen de la diferencia entre índices de vegetación para la zona afectada por el incendio de Buñol. Se observa en tonos oscuros las zonas que han perdido índice de vegetación (NDVI) —esto es, con menor vigor vegetal, como consecuencia del fuego—, mientras las zonas más claras corresponden a las que han incrementado el NDVI, y los grises medios a las zonas estables.

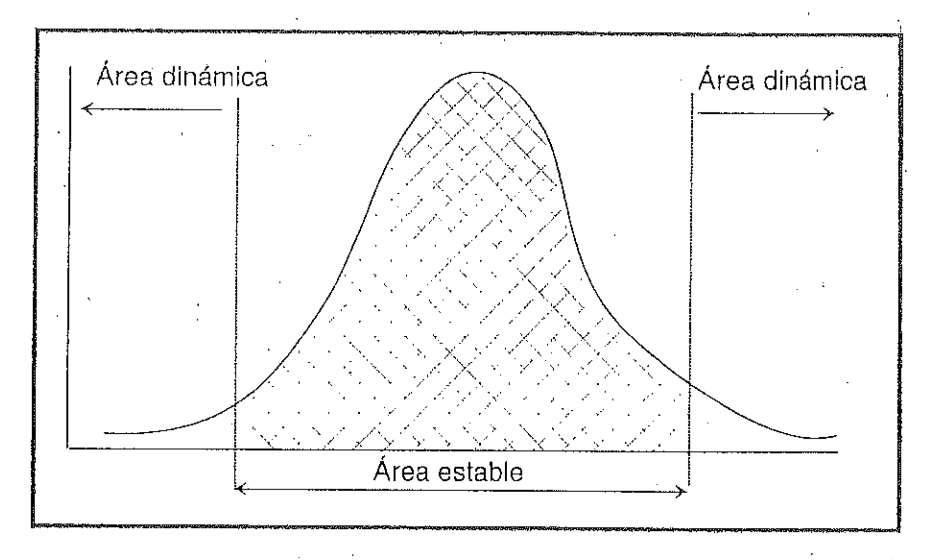


Fig. 7.48 - *Histograma de la imagen de cambios, áreas estables y dinámicas*

7.3.3.3. Cocientes multitemporales

La diferencia entre imágenes resulta una técnica sencilla para observar cambios entre fechas, si bien tiene el problema de reflejar únicamente las diferencias absolutas, pero no ofrece la significación del cambio frente a los valores

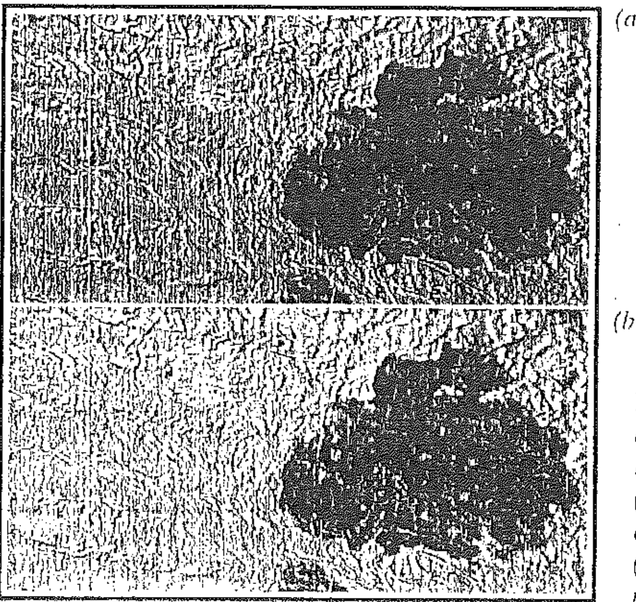


Fig. 7.49 - *Imágenes de cambio del incendio de Buñol: (a) diferencia entre NDVI; (b)cociente normalizado.*

originales. Por ejemplo, una reducción de 20 ND entre fechas puede significar un deterioro significativo si el ND original era 40, mientras resultará menos importante si el ND de la primera fecha era de 200. Para subsanar ese problema, puede ser más conveniente en ocasiones emplear cocientes multitemporales, que ofrecen una valoración relativa del cambio:

$$ND_c = (ND_{t2} / ND_{t1}) * C \qquad [7.66]$$

con el mismo significado de la fórmula anterior, o también los índices multitemporales normalizados:

$$ND_{i,j,c} = ((ND_{t2}-ND_{t1})/(ND_{t2}+ND_{t1})) + 1) * 127 \qquad [7.67]$$

en este caso se añade al índice 1 y se multiplica el resultado por 127 para escalar el resultado entre 0 y 254.

Los cocientes multitemporales se han empleado en inventarios agrícolas (Mussakowski, 1985; Lo et al., 1986) y forestales (Howarth y Wickware, 1981; Singh, 1986). En aplicaciones ambientales, es frecuente que estos cocientes se calculen a partir de los índices de vegetación, lo que permite simplificar la variación vegetal en una sola banda. En este contexto, se han empleado con gran éxito los cocientes en estudios de deforestación (Singh, 1986; Vargas y Chuvieco, 1991; Grover et al., 1995), e incendios forestales (Martín y Chuvieco, 1995; Kasischke et al., 1993).

El principal problema de los cocientes multitemporales es su carácter no simétrico. En otras palabras, el resultado es dependiente de qué fecha elijamos para el numerador. Una reducción a la mitad del ND (p.ej. de 100 a 50) ofrece un valor de 2 ó de 0,5 según el orden en que introduzcamos las fechas. En definitiva, implica una transformación no lineal de las relaciones temporales. Para solucionar este problema, algunos autores recomiendan realizar una conversión logarítmica del resultado (Eastman et al., 1994).

La figura 7.49b nos ofrece una imagen del cociente normalizado de los NDVI correspondientes al incendio de Buñol, junto a la imagen de diferencias simples. En este caso, la delimitación del área quemada es bastante clara y similar en ambas técnicas, observándose tanto el perímetro propiamente dicho, como sectores dentro de la mancha quemada donde el incendio fue menos severo o había menor presencia vegetal.

7.3.3.4. Componentes Principales

Como antes señalamos (7.1.4), el análisis de componentes principales (ACP) permite sintetizar un conjunto de bandas en otro más reducido, sin perder

gran parte de la información original. En el caso de aplicaciones multitemporales, se utiliza esta técnica de un modo particular. Se genera, en primer lugar, un archivo multitemporal con las bandas correspondientes a las dos fechas, sobre el que se aplica el ACP. En este caso, los primeros componentes resultantes del análisis no son los más interesantes, ya que recogerán la información común a las dos fechas; esto es, la estable. Por su parte, los componentes inferiores ofrecen la información no común: el cambio, que es precisamente lo que más interesa en este contexto.

El ACP se ha utilizado frecuentemente en detección de cambios. Para 2 imágenes MSS (4 bandas cada una), se ha comprobado que los componentes 3, 4 y 5 recogen habitualmente el cambio entre fechas (Byrne et al., 1980). Algunos autores interpretan que los dos primeros componentes de ese conjunto de 8 ofrecen información sobre el brillo y el verdor estables en la imagen, mientras el 3° indica cambio en el brillo y el 4° cambio en el verdor (Ingebritsen y Lyon, 1985; Fung y Ledrew, 1987; Fung, 1988). También en ocasiones se han comparado los componentes principales deducidos para cada fecha, por separado, aplicando una diferencia o cociente entre ellos (Singh, 1986; Coppin y Bauer, 1994).

En la tabla 7.12 aparecen los autovectores correspondientes a dos imágenes de la reserva forestal de Ticoporo (Venezuela), adquiridas por los sensores MSS y SPOT en 1972 y 1989 respectivamente (Vargas, 1995). Como puede observarse, los primeros componentes indican estabilidad entre fechas, mientras el 3° y 4° manifiestan cambios en la escena. El tercer componente es el más interesante, pues muestra los cambios en la vegetación, ya que cambian los signos de las tres bandas entre las dos fechas (en la primera, valoración negativa del infrarrojo cercano y positiva de las visibles, y al contrario en la segunda). En definitiva, este componente está bastante asociado a los procesos de deforestación que se han producido en la zona en este período.

Banda	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6
72IRC	-0,03	0,09	-0,44	0,87	0,17	0,08
72ROJO	0,10	-0,11	0,66	0,37	0,17	-0,62
72VERDE	0,09	-0,08	0,57	0,20	0,12	0,78
89IRC	-0,18	0,97	0,18	-0,01	0,02	-0,02
89ROJO	0,83	0,17	-0,02	0,10	-0,53	0,00
89VERDE	0,52	0,10	-0,15	-0,23	0,80	0,00

Fuente : Vargas (1995)

Tabla 7.12 - *Autovectores del ACP multitemporal (imágenes de Ticoporo)*

El ACP también puede aplicarse a variables derivadas, como son los índices de vegetación. En la tabla 7.13 se muestran los autovectores correspondientes a los NDVI de la imagen de Buñol que venimos comentando en este capítulo. Se han considerado las tres imágenes: anterior (julio), inmediatamente posterior (agosto) y un año posterior al fuego (noviembre). El primer componente, que expresa el 60,28 % de la varianza original, recoge la variación común a las tres fechas. El segundo, que alberga el 25,15 % de la varianza, muestra con claridad una valoración de la vegetación quemada, ya que presenta correlaciones negativas con la primera fecha y positivas con las siguientes. Indica, por tanto, un aumento del vigor vegetal, por lo que el área quemada mostrará los tonos más bajos en este componente. El tercero, que recoge un 14,57 % de la varianza original, está relacionado con la regeneración posterior al fuego, al presentar signos positivos en la tercera fecha y negativos en las dos primeras. Si generamos las imágenes de estos componentes multitemporales, podremos observar el sentido temático de esta transformación. Como ya hemos comentado, el segundo es el más nítidamente relacionado con la delimitación del área quemada (fig. 7.50).

7.3.3.5. Regresión

Como es bien sabido, las técnicas de regresión se emplean para estimar valores de una variable de interés a partir de otra que está fuertemente asociada con ella. Esa asociación se mide a partir de unas observaciones comunes a ambas variables, a partir de las cuales se ajusta una función que las relaciona numéricamente. La técnica de regresión más utilizada es la lineal simple, en la cual la variable a estimar (denominada dependiente) se calcula a partir de otra auxiliar (que denominamos independiente) con una ecuación del tipo:

$$\hat{y} = a + bx$$

donde x indica la variable independiente e y la dependiente. El símbolo $\hat{y}$ denota que la ecuación de regresión ofrece sólo un valor estimado de la variable dependiente y, más o menos cercano al original cuanto mayor sea la relación lineal entre x e y. La importancia de estas desviaciones, conocidas como residuales, indica la

AUTOVECTORES

	CP1	CP2	CP3
NDVI (Julio)	0,505275	-0,818841	-0,272391
NDVI (Agosto)	0,582086	0,556424	-0,592932
NDVI (Noviembre)	0,637082	0,141039	0,757783

Tabla 7.13 - *Componentes Principales de las imágenes NDVI de julio, agosto y noviembre de la zona de Buñol*

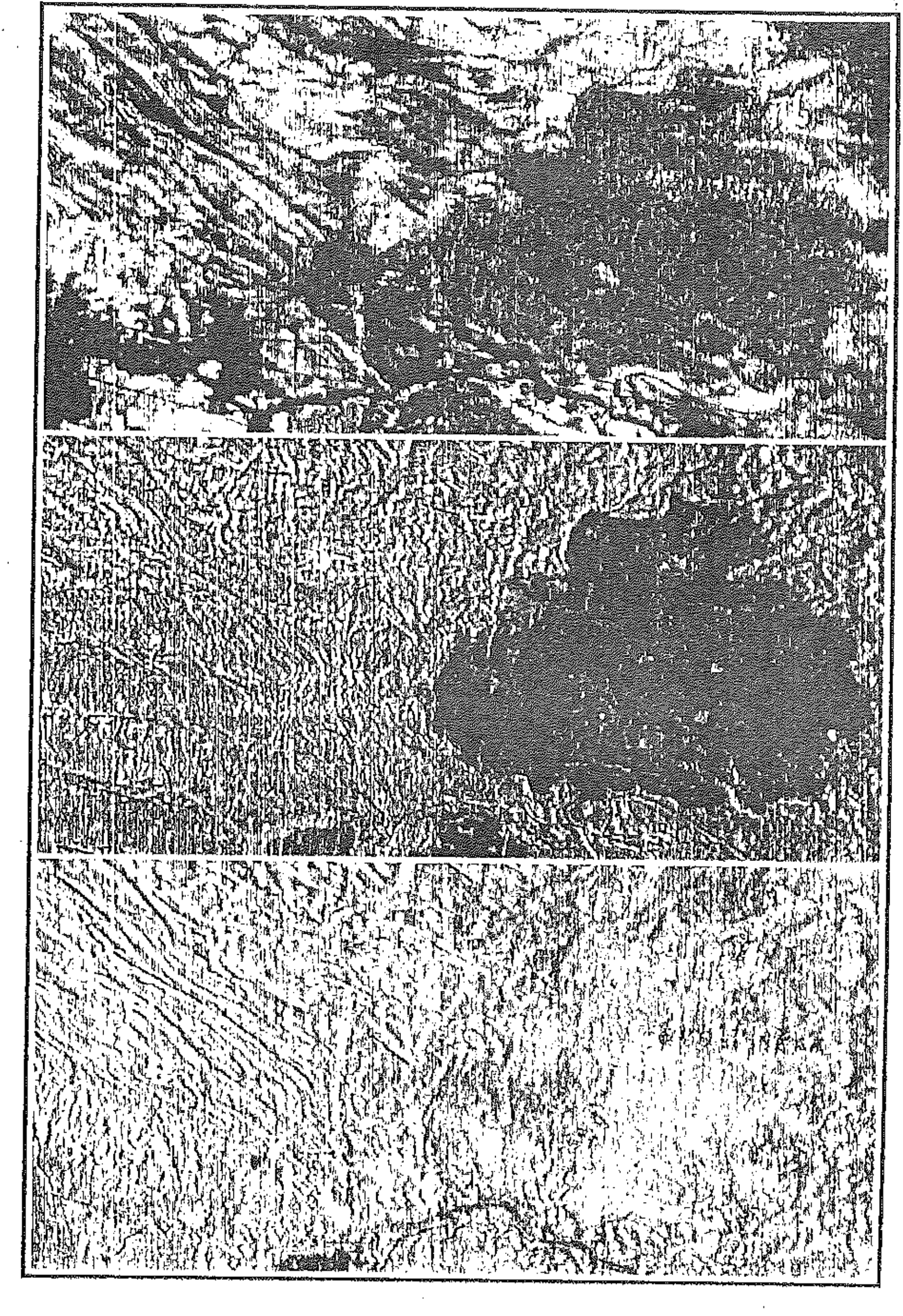


Fig. 7.50 - *Imagen de componentes principales multitemporales. De arriba a abajo, los componentes primero, segundo y tercero que figuran en la tabla 7.13.*

calidad del ajuste. Ya tuvimos ocasión de comentar esta técnica con motivo de las correcciones geométricas (cap. 6.5); en ese caso las variables independientes eran las coordenadas X e Y de la imagen, y las dependientes la columna y fila a corregir, mientras los residuales eran los desplazamientos medios en las dos coordenadas.

En el contexto de la detección de cambios, las técnicas de regresión se utilizan para estimar cuáles serían los ND de la imagen de la segunda fecha, caso de que no hubiera habido cambios. En definitiva:

$$\hat{ND}_{t2} = a + b * ND_{t1} \qquad [7.68]$$

Si se han producido cambios entre imágenes, los ND reales de la segunda fecha presentarán valores alejados de los estimados por la regresión, o lo que es lo mismo contarán con altos residuales:

$$ND_{c} = ND_{t2} - \hat{ND}_{t2} \qquad [7.69]$$

Los coeficientes de regresión pueden calcularse para todos los ND de la imagen o a partir de un muestreo. En el primer caso, puede violentarse algún requisito de la regresión, ya que los ND presentan una clara autocorrelación espacial (Congalton, 1988a; Eastman et al., 1994), además de complicar los cálculos. La regresión multitemporal se ha utilizado para determinar cambios en áreas urbanas (Molina y Chuvieco, 1995), y forestales (Martín et al., 1994a; Vargas, 1995), con buenos resultados.

En la imagen que estamos utilizando como ejemplo, las imágenes anteriores y posteriores al incendio presentaron una correlación global bastante baja, ya que el área quemada ocupa un sector muy importante de la escena. Señalando zonas estables entre fechas, se construyó la imagen de la segunda fecha estimada por la regresión, restándose de la imagen real. Los residuales nos muestran con claridad el perímetro del incendio, que presenta unos valores reales mucho más bajos que los estimados, a consecuencia de la pérdida de NDVI provocada por el incendio (fig. 7.51).

7.3.3.6. *Vectores multitemporales*

Es una técnica que intenta incorporar no sólo la importancia, sino también la dirección del cambio entre imágenes. Si representamos en un eje bivariado dos bandas originales (por ejemplo, la rojo e infrarrojo cercano), cada píxel viene definido por un punto (localización de sus ND en las dos bandas). Si ese píxel cambia su cobertura entre dos fechas, también modificará su emplazamiento espectral. La magnitud del cambio vendrá dado por la longitud del vector que separa ambos puntos. Por su parte, el sentido del cambio se define por el ángulo que

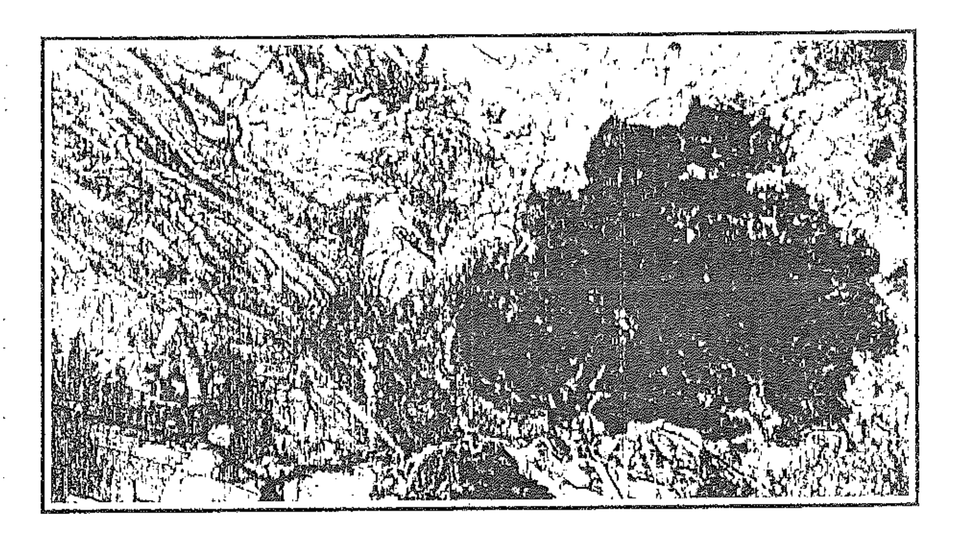


Fig. 7.51 - *Imagen de residuales de la regresión multitemporal*

forma con el eje de referencia (fig. 7.52). Caso de que el píxel haya reducido el vigor vegetal, tenderá a disminuir su ND en el infrarrojo cercano y aumentarlo en el rojo. En consecuencia, el vector presentará una dirección descendente y hacia la derecha del gráfico (en términos geográficos tendría dirección SE). Por el contrario, si aumentara su cobertura vegetal el vector presentaría una dirección NW.

Con este sencillo ejemplo, podemos introducir el interés de este tipo de análisis para la detección de cambios, ya que nos ofrece una imagen de su magnitud y sentido. La intensidad del cambio se identifica con la longitud del eje, que puede obtenerse a partir de calcular la distancia entre la localización espectral de cada píxel en las dos fechas:

$$d_{i,j,c} = \sqrt{(ND_{i,t1} - ND_{i,t2})^2 + (ND_{j,t1} - ND_{j,t2})^2} \qquad [7.70]$$

donde $d_{i,j,c}$ indica la intensidad del cambio espectral en las bandas i,j entre los dos períodos considerados (t_1 y t_2). Por su parte, la dirección del cambio puede calcularse a partir del ángulo que forma el vector de cambio con la vertical (α):

$$\alpha = \mathrm{arctg}\left(\frac{ND_{j,t1} - ND_{j,t2}}{ND_{i,t1} - ND_{i,t2}}\right) \qquad [7.71]$$

En la figura 7.53 aparecen los dos componentes de intensidad y dirección del cambio para la imagen del incendio de Buñol que venimos comentando en este capítulo. Esta figura se ha generado a partir de las bandas 3 y 4 de la imagen Landsat-TM. La imagen de intensidad muestra los tonos más claros para las áreas

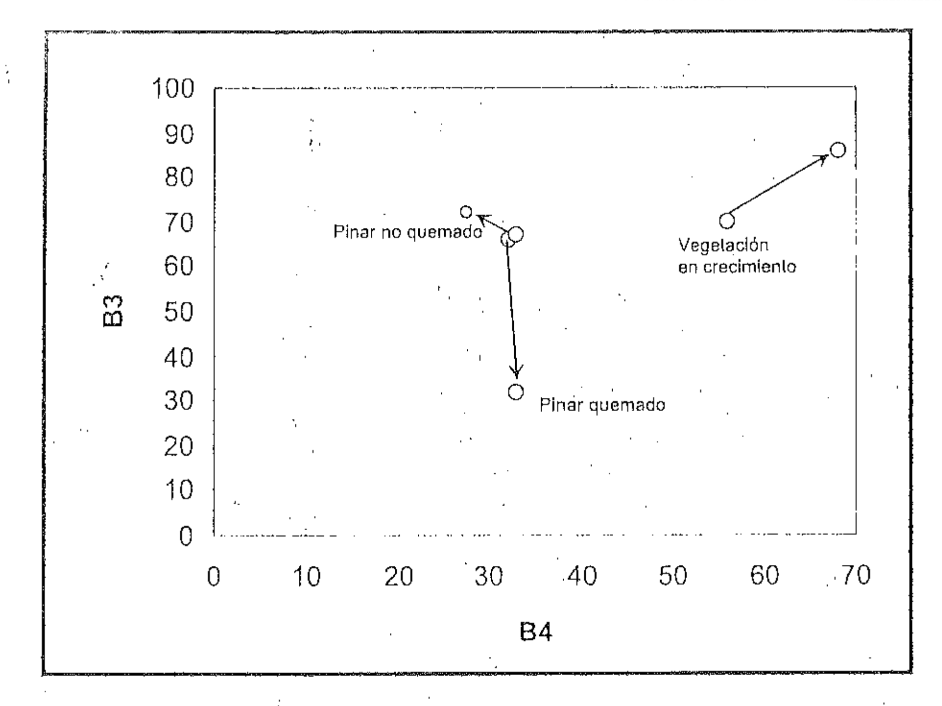


Fig. 7.52 - *Vectores de cambio*

afectadas por el fuego, ya que son éstas las que han experimentado un cambio más intenso entre las dos fechas. Además se muestran en el vértice NE de la imagen unas pequeñas zonas afectadas por nubes en la segunda fecha, por lo que también ofrecen un cambio bastante intenso y, en consecuencia, tonos claros. La imagen inferior muestra la dirección del cambio. Como puede observarse las dos clases que más intensamente han cambiado (de vegetación sana a quemada, y de vegetación a nubes), muestran ahora tonos muy distintos, en función del sentido del cambio. En el primer caso, los tonos son oscuros, indicando que los ND de la segunda fecha son inferiores a los de la primera.

7.3.3.7. El problema de delimitar los umbrales

Todos los métodos hasta aquí analizados facilitan imágenes "continuas" del cambio. En otras palabras, el resultado de los cálculos es una imagen en donde el ND indica el grado de cambio, desde la mayor pérdida a la mayor ganancia, en una escala gradual. Habitualmente, el intérprete pretende más bien generar una imagen categorizada, en donde se separen las clases de cambio y no cambio. En consecuencia, es preciso segmentar la imagen resultante de las técnicas anteriores, de tal forma que se delimiten las zonas dinámicas de las que han permanecido estables. El límite entre ambas resulta complicado de trazar, ya que no contamos

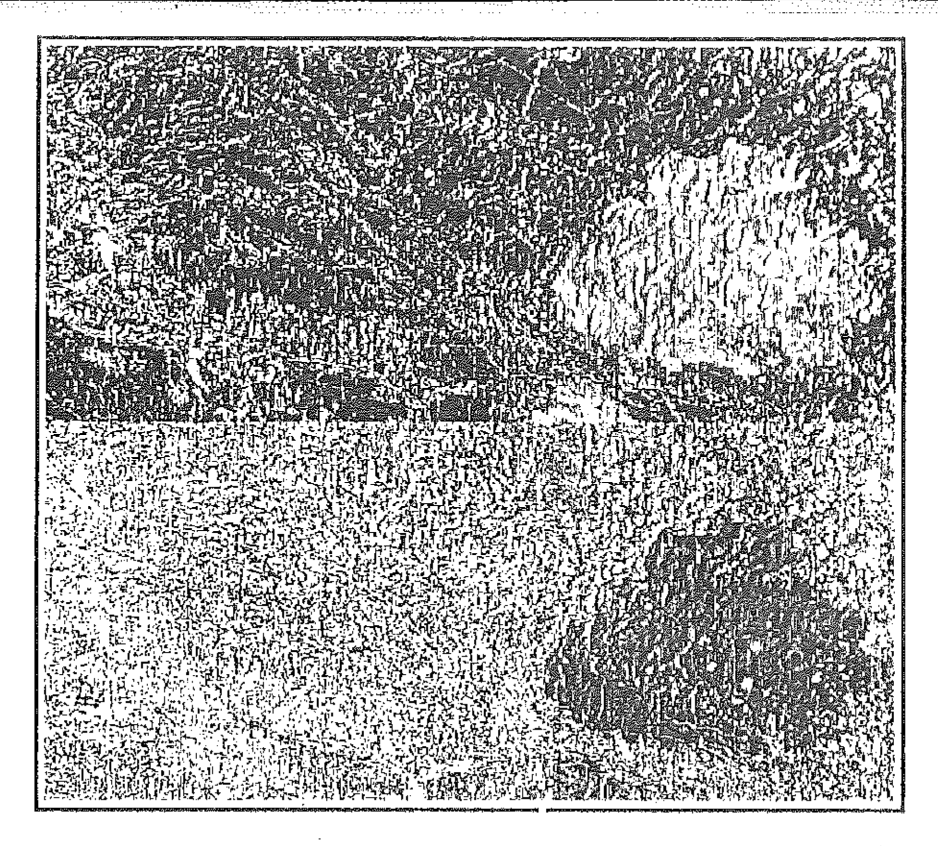


Fig. 7.53 - *Vectores de cambio en la imagen de Buñol generados a partir de las bandas 3 y 4: en la parte superior, intensidad; en la inferior, dirección.*

con criterios objetivos y de aplicación general. En teoría, el histograma de la imagen de cambios debería permitir esta segmentación, ofreciendo un perfil bimodal correspondiente a los píxeles estables y dinámicos. Sin embargo, en la práctica, los histogramas no definen con tanta claridad ese umbral, ya que los cambios en la naturaleza no se producen de modo abrupto sino gradual. Por ejemplo, si pretendemos delimitar sobre una imagen de cambios el área quemada, el histograma nos muestra una frecuencia bastante continua (fig. 7.54), aunque el tamaño del incendio hace que se muestre con claridad un perfil bimodal, correspondiendo el pico inferior a la vegetación quemada. Sin embargo, el fuego afecta a la vegetación con distintos grados de intensidad y a zonas con distinta densidad de vegetación, por lo que en la imagen de cambios existe también un gradiente continuo. En definitiva, las categorías quemado-no quemado no se presentan rígidamente separadas. Por esta razón, resultan tan interesantes las técnicas de discriminación sub-píxel, como el análisis lineal de mezclas espectrales (cap. 7.1.6) o la clasificación borrosa (7.2.3.4), ya que ofrecen clasificaciones continuas de cada categoría.

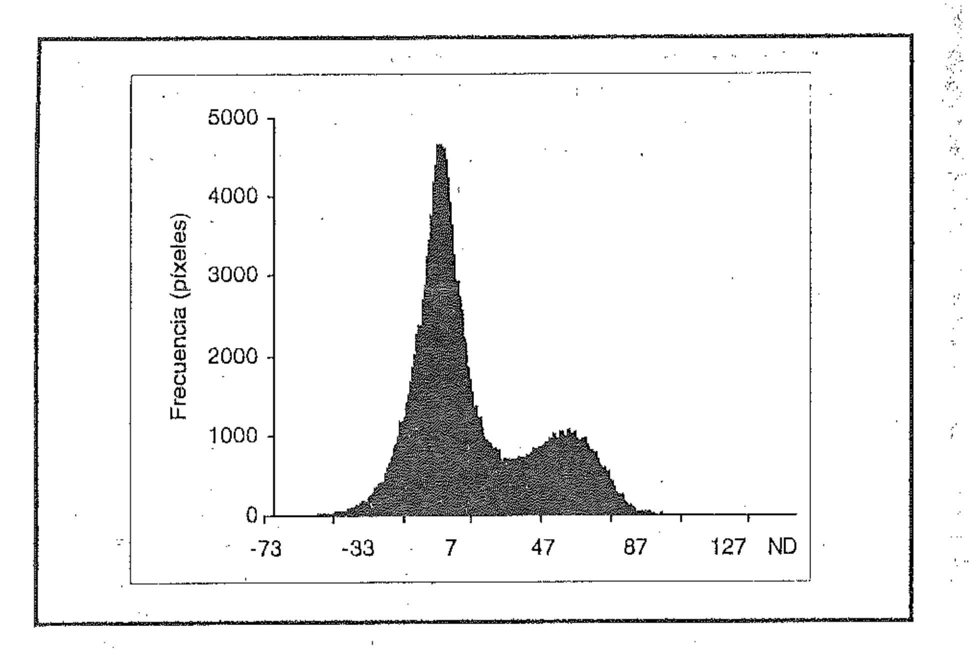


Fig. 7.54 - *Histograma de la imagen de diferencias multitemporales de Buñol*

No obstante lo dicho, en muchas ocasiones se requiere que la evaluación del cambio se ofrezca en clases temáticas separadas, por lo que resulta preciso segmentar las imágenes de cambio a partir de algún criterio objetivo. Se han ofrecido distintas opciones, las más habituales son señalar umbrales teóricos de cambio o fijar como límite algún múltiplo de la desviación típica. El primer criterio puede ser apropiado para segmentar imágenes de cambio generadas a partir de índices de vegetación (como el NDVI), ya que pueden señalarse umbrales a partir de los que puede considerarse que el decremento del NDVI manifiesta un cambio en la cubierta vegetal original. Éste ha sido el criterio aplicado para discriminar áreas quemadas (Martín et al., 1994b), o zonas deforestadas (Vargas, 1995).

El empleo de múltiplos de la desviación típica resulta estadísticamente apropiado, ya que este valor se reconoce como medida válida de la dispersión. El problema es fijar qué múltiplo es más apropiado, ya que no se conoce qué porcentaje de cambio incluyen las imágenes. Algunos autores han ensayado la aplicación sucesiva de distintos múltiplos de la desviación típica para delimitar cambios urbanos entre dos imágenes. En cada iteración, las zonas de cambio y no cambio se separaban a partir del límite fijado por n desviaciones típicas (± la media), variando n desde 0,1 hasta 2. Las áreas categorizadas como de cambio se verificaban con parcelas delimitadas en el terreno, calculándose la fiabilidad para cada iteración (Fung y Ledrew, 1988; Fung, 1992). Los límites idóneos variaban con cada técnica de detección utilizada, si bien se encontraban en torno a una desviación típica de la media. Ese límite puede considerarse estadísticamente razonable, pero no sabemos si el resultado es extrapolable a otra zona o a otro tipo de aplicación.

Un último criterio es clasificar las imágenes de cambio obtenidas por distintas técnicas, con objeto de establecer grupos homogéneos de píxeles estables y dinámicos. Pueden realizarse clasificaciones supervisadas, a partir de áreas que se conozcan como estables o dinámicas, o no supervisadas, dejando al ordenador que seleccione los grupos naturales presentes en esas imágenes. El criterio ha dado buenos resultados en aplicaciones forestales (Coppin y Bauer, 1994) —clasificando imágenes de cambio generadas a partir de la transformación *tasseled cap*, índices de vegetación y análisis de componentes principales—, y urbanas (Wang, 1993a), en este caso sobre las bandas originales de las dos fechas.

7.3.3.8. *Análisis multitemporal de imágenes categorizadas*

La detección de cambios puede también abordarse empleando las técnicas de clasificación antes comentadas. En este caso, no se presenta el problema de delimitar umbrales, ya que clasificar implica discretizar la escala continua de las imágenes originales.

Delimitar cambios a partir de la clasificación puede abordarse con un doble enfoque: (i) comparando imágenes previamente clasificadas, y (ii) clasificando conjuntamente las imágenes de las dos fechas. En el primer caso, se aborda una clasificación a cada imagen por separado, cuidando de emplear la misma leyenda temática en las dos fechas, con objeto de que puedan compararse posteriormente. A continuación, se genera una tabla multitemporal de cambios, en donde se presentan las transiciones que se producen entre las dos fechas (tabla 7.14). En la diagonal de esta tabla aparecen los píxeles estables (que cuentan con la misma categoría en las dos fechas), mientras los cambios se detectan en el resto de las celdillas. El gran interés de esta tabla es ofrecernos las transiciones que se han producido. En otras palabras, no sólo observamos las zonas estables y dinámicas, sino también cuál era la cobertura original y cuál la actual, lo que nos indica las tendencias del cambio en la zona de estudio. En un estudio de deforestación, esto nos permitiría conocer qué tipo de zonas forestales están siendo más afectadas; en una evaluación de incendios, qué especies se han quemado, y en un estudio urbano, qué espacios están experimentado un mayor proceso de urbanización (Adeniyi, 1985; Martin y Howarth, 1989; Molina y Chuvieco, 1995). En este sentido, puede aplicarse algún estadístico para medir el grado de cambio entre las dos fechas, a partir de calcular su grado de asociación. Por ejemplo, el índice kappa, que luego veremos en el contexto de la verificación de imágenes (cap. 8), permite calcular el grado de acuerdo entre filas y columnas de una matriz cuadrada; en este caso, ese

... 1989 / ... 1987	Gramíneas	Bosque llanero	Bosque llanero Degradado	Bosque de Galería	Bosque de Galería Degradado
...íneas	29,30	2,26	–	–	–
Bosque Llanero	13,39	12,72	30,53	–	–
Bosque de Galería	–	–	–	1,77	9,30

Vargas y Chuvieco (1992)

...bla 7.14 - *Cambios entre cubiertas vegetales en el sector de Ticoporo (porcentaje sobre el total de la imagen)*

...dice mediría el grado de cambio: cuanto más alto fuera, indicaría una mayor estabilidad en las categorías presentes en la imagen.

En un análisis posterior podría analizarse el origen de estos cambios, acudiendo a información auxiliar almacenada en un Sistema de Información Geográfica (S.I.G.). Por ejemplo, abandonos de tierras podrían explicarse por ...ctores relacionados con la productividad del suelo, con la topografía o con la ...cesibilidad (Bosque et al., 1991).

El principal problema de esta tabla es su gran dependencia de la fiabili...d de las clasificaciones individuales. En otras palabras, si las clases no se han discriminado correctamente en cualquiera de las dos fechas, los cruces entre categorías resultarán erróneos, ofreciendo una información imprecisa del cambio. En cualquier caso, la fiabilidad de la tabla multitemporal siempre es inferior a las fiabilidades de cada clasificación[10]. El empleo de técnicas de clasificación borrosa puede paliar algunos de estos errores, ya que ciertas transiciones imposibles (p.ej. de urbano a rural) pueden solventarse observando el grado de pertenencia de cada píxel a esas categorías en las dos fechas (Wang, 1993b).

También es posible abordar una clasificación multitemporal, en donde se combinan las bandas originales de dos o más imágenes antes de realizar la clasificación. En este caso, la clasificación resultante estará formada por categorías multitemporales, definidas por su estabilidad o por su cambio entre las dos fechas. Nombres apropiados a estas clases podrían ser, por ejemplo, "transición de zonas rurales a urbanas", "cambios de agricultura de secano a regadío", o "urbano estable". Esas clases pueden deducirse de una clasificación supervisada, en donde el intérprete señale campos de entrenamiento que hayan experimentado las modificaciones que refleja la leyenda (por ejemplo, áreas que eran rurales en la primera fecha y pasaron a urbanas en la segunda), o no supervisada, donde el intérprete evalúe las transiciones que recoja el agrupamiento automático. En este caso, la fiabilidad no depende de cada imagen, sino que se mide sobre la clasificación resultante, ya que las dos fechas se agrupan conjuntamente. En la tabla 7.14 aparece el resultado de una clasificación no supervisada multitemporal realizada para la reserva forestal de Ticoporo (Venezuela) a partir de dos imágenes SPOT de 1987 y 1989, indicando las transiciones producidas entre las dos fechas (Vargas y Chuvieco, 1991).

[10] Concretamente es su producto. Si las clasificaciones individuales cuentan con una exactitud 0,85 y 0,90, la fiabilidad de la multitemporal será de 0,85 x 0,90 = 0,76.

7.3.4. Series multitemporales

El último empleo del factor multitemporal que vamos a repasar en este capítulo está ligado al análisis de series de imágenes. En este caso, en lugar de detectar cambios entre dos o tres fechas de referencia, se trata más bien de ver tendencias y cambios en la dinámica estacional, comparando una secuencia numerosa de imágenes de la misma zona. Este tipo de trabajos se ha incrementado en los últimos años, como consecuencia del creciente interés por estudiar los efectos del cambio climático global. Desde el punto de vista práctico, la disponibilidad de datos NOAA-AVHRR ha facilitado notablemente este enfoque, ya que cuenta con la resolución temporal adecuada para realizarlos, por un lado, y con un coste razonable para que la adquisición de las series de imágenes resulte accesible, por otro.

La dinámica de la vegetación a escala global ha sido el campo más fructífero de aplicación de este tipo de estudios. A partir de imágenes del NDVI, frecuentemente con datos GAC (ver 3.5.4), se han generado series temporales de imágenes para grandes superficies (el conjunto de un continente). La evolución de los perfiles temporales de distintas zonas de interés se ha relacionado con los patrones de la precipitación (Hougham, 1987; Millington et al., 1994), la evapotranspiración (Cihlar et al., 1991; Martín et al., 1995), la acumulación de CO_2 en la atmósfera (Tucker et al., 1986) o el contenido de humedad en las plantas (Paltridge y Barber, 1988; Alonso et al., 1996). Además, contar con una información exhaustiva sobre los ritmos estacionales de la cubierta del suelo permite abordar clasificaciones globales a escala continental (Brown et al., 1993; Defries y Townshend, 1994). La figura 7.55 recoge los perfiles temporales del NDVI y la temperatura de superficie (TS), para una serie de cubiertas del suelo en Andalucía, tomadas de una serie de 11 compuestos de imágenes AVHRR del año 1994. Puede observarse cómo estos perfiles reflejan las características del desarrollo estacional de cada cubierta entre la primavera y el verano. Resulta especialmente significativo el contraste entre las dos variables (NDVI y TS), ya que ambas reflejan dos fenómenos contrapuestos en la fisiología de las cubiertas vegetales.

Resulta muy conveniente detectar los cambios en estos perfiles estacionales de la vegetación, pues pueden ser reflejo de patrones climáticos o de alteraciones

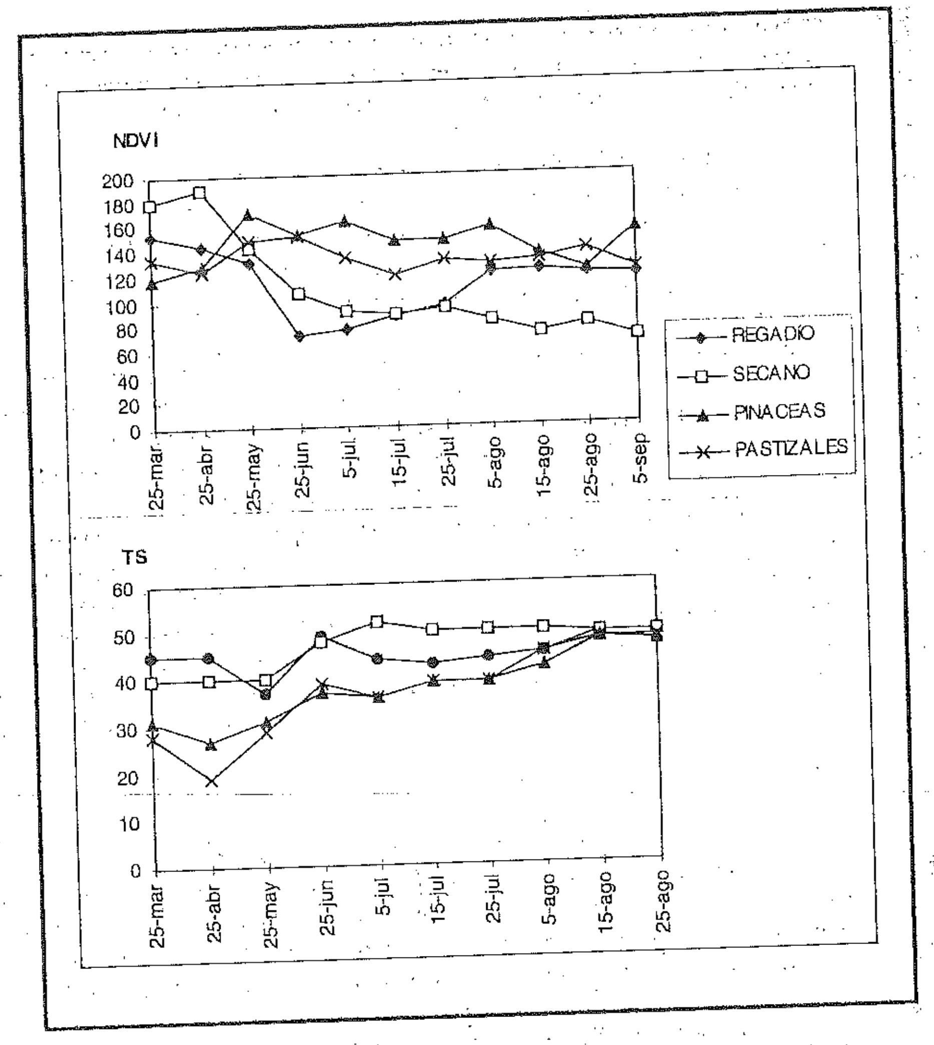


Fig. 7.55 - *Perfiles temporales para distintas cubiertas en Andalucía. Los datos corresponden a la primavera y el verano de 1994. En la parte superior se muestra la evolución estacional del NDVI (los valores están escalados entre 0 y 200), mientras en la inferior se indica la temperatura de superficie en grados centígrados.*

antrópicas. Por ejemplo, se ha comprobado que el fenómeno del Niño altera notablemente los ritmos fenológicos de la vegetación, implicando anomalías con gran radio de influencia (Eastman y Fulk, 1993).

Al tratarse de un mayor número de imágenes, las técnicas más utilizadas aquí para discriminar anomalías suelen basarse en la comparación entre los valo-

res de una determinada imagen y la tendencia promedio medida par... (Eastman et al., 1994). Esa tendencia puede obtenerse, para cada píx... la media aritmética o la mediana de los ND de todas las imágenes. Ta... emplearse el primer componente principal de la serie, que se asu... tendencia general de la misma. A partir de ese ND promedio, las de... cada fecha se obtienen por una simple diferencia o cociente, de mo... proceso comentado previamente.

Asimismo puede aplicarse el análisis de componentes prin... la serie. En este caso, los primeros componentes principales indic... promedio y los restantes particularidades del cambio en el período... partir de componentes principales estandarizados, Eastman y Fulk... vieron un interesante análisis de las tendencias de la vegetación en A... de una serie temporal de 36 imágenes cubriendo todo el continent... que los primeros componentes recogían la tendencia promedio, mi... tantes marcaban algunos rasgos de interés en la fenología de l... detectando eventos anómalos de sequía, e incluso algunos errores en la ... ción de las imágenes, difícilmente perceptibles sobre las originales.

Otros criterios para la interpretación de series temporales se apoy... estandarizar los valores de cada fecha, y especialmente los índices de veg... (NDVI), frente al máximo y mínimo del período. De esta forma pued... mejor en cada píxel el cambio debido a las condiciones climáticas, ... absoluto del NDVI a veces está más relacionado con la composic... del píxel (% cubierta verde) que con su dinamismo estacional. P... componente dinámico, se calculan los índices de verdor (Kogan, 1990):

$$VERDOR_i = \frac{NDVI_i - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} * 100 \quad (7.$$

donde $VERDOR_i$ indica el verdor relativo para el período i; $NDVI_i$ el v... índice de vegetación para ese período, y $NDVI_{min}$ y $NDVI_{max}$ los valores m... y mínimos de los índices para la serie de imágenes analizada. Est... comprobado que resulta bastante adecuado para detectar tendencias ... la vegetación, sirviendo de gran ayuda para determinar situaciones de ri... incendios (Burgan y Hartford, 1993; Burgan, 1995) o condiciones de ... et al., 1991). El índice también puede aplicarse a la temperatura ... originales del sensor.

Otro índice frecuentemente aplicado a series temporales es ... de los índices de vegetación. Intentan medir el efecto acumulado de ... en estos índices. Una manera sencilla de calcularlo es restar el valor de ... del precedente, si bien resulta más apropiado calcular el cambio en fu...

longitud del período considerado o, dicho de otra forma, la pendiente de la línea que define la evolución temporal del índice (Illera et al., 1995):

$$PT_i = \frac{\Sigma_{i=1,n}(NDVI(t_i) - NDVI(t_{i-1}))}{t_i - t_{i-1}} \qquad [7.73]$$

donde PT_i indica la pendiente del período i, y t_i el período de tiempo considerado. Se ha comprobado que este índice permite determinar condiciones de estrés hídrico en la plantas (López et al., 1991; Illera et al., 1995).

7.4. Determinación de la estructura espacial del territorio: la imagen como mosaico paisajístico

7.4.1. Teledetección y ecología del paisaje

Frente a la óptica tradicional de la ecología de campo, preocupada por los análisis a escala de detalle, ha crecido en los últimos años el interés por extender estas observaciones a un marco más amplio, de tal forma que se incluya la variación espacial en el análisis y gestión integral de ecosistemas. En este enfoque, la teledetección y los SIG pueden jugar un papel protagonista, ya que son técnicas que permiten gestionar información georeferenciada, facilitando el análisis espacial de los datos, así como la obtención de variables críticas para un entendimiento más completo del medioambiente (Hoffer, 1994).

Hemos visto en anteriores capítulos que el análisis de imágenes de satélite proporciona la distribución espacial de variables que son claves para entender el funcionamiento de un ecosistema, como son la temperatura de superficie, la radiación interceptada por la vegetación, el contenido de clorofila o de agua en las hojas, o el índice de área foliar.

En este capítulo, vamos a centrarnos en los métodos para obtener información sobre las relaciones espaciales entre los elementos que forman la imagen. Una imagen de satélite puede considerarse como una representación digital del mosaico paisajístico. Por tanto, a partir de estas imágenes, pueden medirse las relaciones espaciales entre los elementos de ese mosaico, denominados, en ecología del paisaje, manchas (*patches*). Al tratarse de una imagen digital, pueden aplicarse sobre las bandas originales, sobre alguna transformación de ellas o sobre una imagen ya clasificada, medidas que permiten evaluar cómo se configuran las distintas cubiertas en un territorio concreto. Las variables de mayor interés para los estudios de ecología del paisaje son la compacidad, que hace referencia a la relación entre el área y el polígono de cada mancha; la conectividad, que refiere a la contigüidad espacial entre manchas; la diversidad, relacionada con la variedad de coberturas en un determinado sector, o la visibilidad, que permite integrar topografía y altura de la cubierta vegetal.

El patrón espacial con el que se presentan las diversas coberturas terrestres tiene gran interés para entender ciertos procesos ecológicos, como la dispersión de organismos, el uso de los recursos por parte de la fauna local (Congalton et al., 1993), la comunicación genética o la extensión espacial de ciertas alteraciones, como son las causadas por fuegos o plagas (Muchoki, 1988; Pearson, 1994). Por ejemplo, la fragmentación espacial del paisaje, que está relacionada con la conectividad/aislamiento que presentan las distintas manchas, puede dificultar la migración de especies, lo que implica un deterioro, o incluso una desaparición de las mismas, al degradarse su composición genética (Griffiths et al., 1993). De igual modo, la proximidad a carreteras o áreas agrícolas está relacionada con situaciones de desequilibrio, pues implica una alteración del número y/o tipo de especies que aparecen en esos bordes. Obviamente, esto no es aplicable por igual a cualquier especie, por lo que es preciso reforzar la investigación sobre las relaciones entre estructura espacial y funcionamiento de los ecosistemas. En consecuencia, la gestión integrada de los mismos implica contar con información no sólo sobre el tipo de cubiertas presentes en el territorio, sino también sobre su disposición espacial. La reciente tendencia a asegurar un «medioambiente sostenible», implica considerar varios aspectos, como son minimizar la fragmentación del hábitat, mantener la biodiversidad, identificar y gestionar efectos acumulativos, y analizar, predecir y vigilar impactos a varias escalas espaciales y temporales (Green, 1994).

El empleo de imágenes de satélite en ecología del paisaje tiene una historia reciente, pero ya cuenta con interesantes ejemplos (Gulinck et al., 1991). En este campo la teledetección ofrece una visión sinóptica del paisaje, constituye un conjunto homogéneo de medidas y facilita el seguimiento multitemporal de fenómenos que afectan a la composición del territorio (Delbaere y Gulinck, 1995).

En lo que se refiere concretamente a la estructura espacial del paisaje, el desarrollo de aplicaciones es bastante más restringido. Podemos dividir los trabajos referenciados en dos grandes grupos: (i) aquéllos que analizan la información espacial de las imágenes para mejorar la clasificación temática, y (ii) los que pretenden medir la estructura del territorio a partir de las imágenes. En el primer grupo pueden incluirse los clasificadores de contexto, previamente analizados (cap. 7.2.3.4), que consideran la variabilidad espacial de un píxel para mejorar su asignación temática, ya sea mediante medidas de textura, ya mediante algoritmos de clasificación que tengan en cuenta la pertenencia de píxeles vecinos. Respecto a los estudios de estructura espacial del territorio, los ejemplos no son muy abundantes. También aquí podríamos hacer una división entre aquellos trabajos que se basan sobre las imágenes medidas en escala continua, ya sean originales, ya aplicando alguna transformación aritmética (índices de vegetación o componentes

principales, por ejemplo), y aquéllos que se basan sobre imágenes clasificadas, esto es, medidas en escala nominal. Sobre estos dos grupos dividiremos la exposición.

7.4.2. Técnicas para medir la estructura espacial de una imagen

7.4.2.1. Medidas de la variación espacial en imágenes de intervalo

Hace referencia este término a imágenes en las que los ND están medidos en una escala numérica continua, por lo que pueden aplicarse sobre ellas técnicas estadísticas apropiadas a variables de intervalo. El objetivo de estas técnicas es medir la textura o contraste espacial entre los píxeles que componen la imagen. Si en términos de interpretación visual, la textura hace referencia a la heterogeneidad con la que aparecen los tonos de gris en una imagen, los índices numéricos de textura se dirigen a medir la variedad espacial entre los ND de los píxeles que forman la imagen. Podemos dividir estos índices entre aquéllos que operan sobre toda la imagen y los que se apoyan en ventanas móviles, que se desplazan consecutivamente afectando en cada paso al píxel central, por lo que crean nuevas imágenes de textura, de modo similar a las operaciones de filtraje previamente vistas (cap.6.6.6).

Entre los índices aplicables al conjunto de la imagen, podemos aplicar los siguientes:

(i) Desviación típica (DT) a lo largo de perfiles. La DT del conjunto de la imagen no resulta apropiada para medir el contraste espacial de la imagen, ya que solamente tiene en cuenta el contraste de los ND, pero no la variedad en su localización dentro de la imagen. En otras palabras, mide más bien el contraste tonal que el espacial. Dos imágenes pueden tener el mismo patrón espacial pero DT muy distintas, por contar con una cubierta que presente un marcado contraste espectral con el resto (fig. 7.56). Por esta razón, es preferible emplear la DT calculada para los ND de los píxeles que atraviesen uno o varios transectos de la imagen. En este caso, con algunas de las limitaciones antes apuntadas, la DT resulta más apropiada para ver el contraste espacial, pues informa sobre la similitud entre píxeles que están próximos. Imágenes que hayan perdido diversidad espacial, como consecuencia de cambios en la cobertura del suelo, tenderán a presentar un perfil más plano, con menor aparición de crestas y valles marcados (fig. 7.57).

(ii) Dimensión fractal. La geometría fractal asume que la dimensión de un objeto no es entera, sino real. En la geometría clásica, una línea posee una dimensión de 1, una superficie de 2 y un volumen de 3. En términos fractales, una línea posee una dimensión comprendida entre 1 y 2, con valores tanto más altos cuanto más complejo sea su trazado. En el contexto del análisis de imágenes, la dimensión fractal puede facilitar una valoración numérica del grado de complejidad espacial de una determinada escena. Al tratarse de una superficie, una imagen

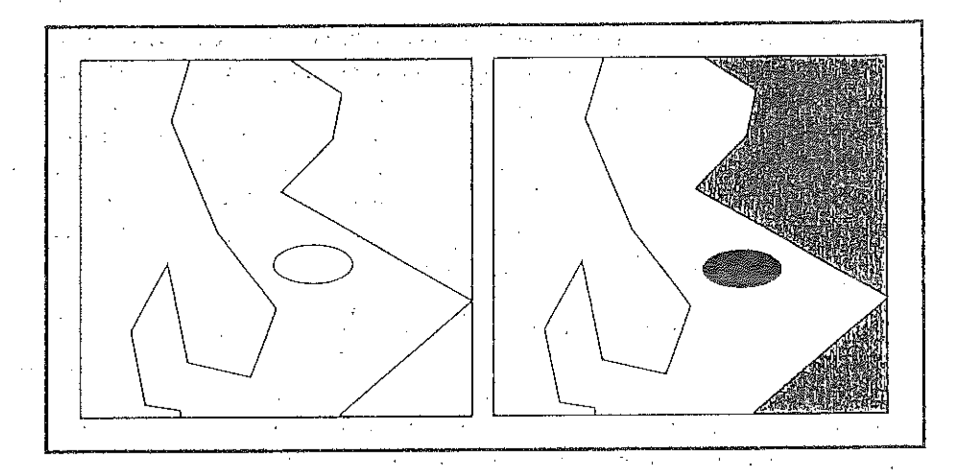


Fig. 7.56 - *La presencia de un contraste tonal fuerte implica un aumento de la desviación típica de la imagen, aunque el patrón espacial sea el mismo*

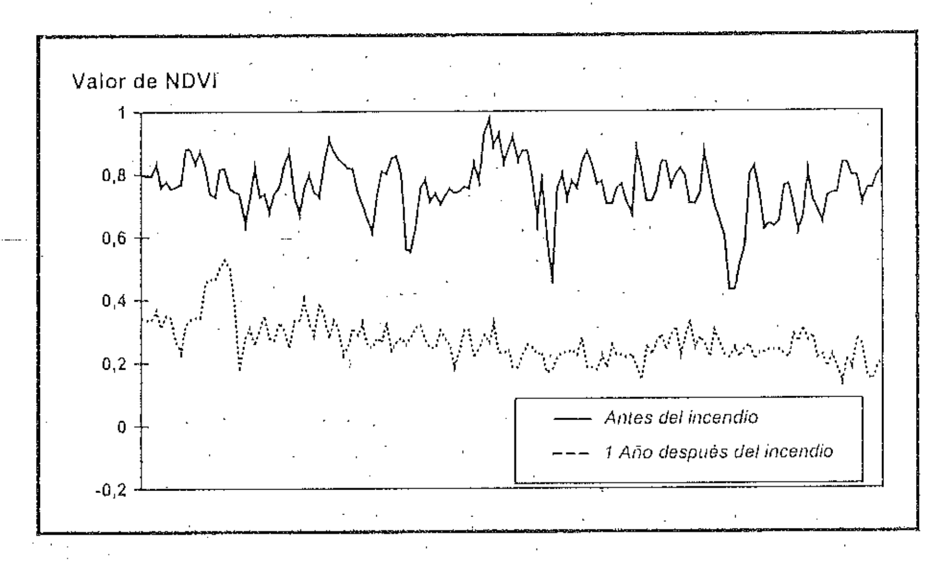


Fig. 7.57 - *Los transectos sobre valores de NDVI de las imágenes del incendio de Buñol nos permiten evaluar numéricamente los cambios en la estructura espacial causados por el fuego (Chuvieco, 1996).*

tendrá una dimensión fractal entre 2 y 3, aproximándose más a 3 cuanto mayor heterogeneidad espacial presente. Aunque esta medida se ha empleado en diversos estudios de ecología del paisaje, su cálculo no es muy evidente sobre una imagen de intervalo. En una aplicación pionera de la geometría fractal al análisis de imágenes Landsat, Lam (1990) midió la dimensión fractal de imágenes TM correspondientes a distintos paisajes. De acuerdo a lo esperable, el valor más alto

calculado correspondió a una imagen de un área urbana, frente a otras con mayor predominio de espacios rurales. Las bandas más complejas resultaron la 1, 2 y 3, y la más homogénea la 6 (térmica), por contar con menor resolución espacial y radiométrica que las visibles. En todos los ejemplos, se encontró que la dimensión fractal de una imagen no clasificada es bastante alta, superando el valor 2,6 (salvo la térmica, con un valor de 2,2), lo que indica que las imágenes de satélite son espacialmente mucho más complejas que otras variables geográficas, como los modelos digitales de elevación (Lam, 1990).

(iii) Auto-correlación espacial (AE). Las técnicas de AE pretenden medir la asociación entre variables debida a la distancia (Cliff y Ord, 1973). Resulta lógico pensar que los rasgos de la cubierta terrestre se parecen más entre sí cuanto más cerca están, ya que en el paisaje son poco comunes los cambios bruscos. La medida de esta asociación espacial puede obtenerse a partir del índice (I), ideado por Moran (Moran, 1948), que mide la correlación que existe entre cada píxel y sus vecinos:

$$I = (n/2A) * ((\Sigma_{i=1,n} \Sigma_{j=1,n} z_i z_j) / \Sigma_{i=1,n} z_i^2) \qquad [7.74]$$

donde n indica el número de píxeles considerados, A el número de posibles uniones entre esos píxeles, z_i la desviación del píxel i frente a la media ($ND_i - \overline{ND}$), y z_j las desviaciones frente a la media de todos píxeles adyacentes al píxel i. Al igual que el coeficiente de correlación de Pearson, el índice de Moran oscila entre -1 y +1, aumentando cuanto mayor sea la uniformidad espacial del paisaje. Puede calcularse para cualquier dirección (de modo similar al movimiento del rey sobre un tablero de ajedrez), o para algunas direcciones (caso del alfil o de la torre). Este índice se ha utilizado como medida de la uniformidad del paisaje, así como estudiar su dinámica como consecuencia de distintos fenómenos exógenos (Pickup y Forán, 1987; Henebry, 1993; Chuvieco, 1996).

(iv) Semi-variograma. Basado sobre el mismo concepto de autocorrelación espacial, puede obtenerse un gráfico que muestre cómo se modifica la varianza espacial (esto es, la dispersión de un conjunto de valores vecinos) con la distancia, lo que permite tener una idea bastante precisa de la variación espacial de una imagen. El semi-variograma se obtiene a partir de la siguiente función (Chica, 1988):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2NP(h)} \Sigma_{i=1,NP(h)} (ND(x_i+h)-ND(x_i))^2 \qquad [7.75]$$

donde γ (h) indica la varianza espacial para una distancia h, NP (h) el número de píxeles incluidos en ese radio h, y ND (x_i) el ND correspondiente al píxel x_i. El semi-variograma se puede calcular en una dirección determinada o, lo que es más habitual en teledetección, en un radio, considerando todas las distancias. La representación gráfica de γ (h) nos muestra cómo aumenta la varianza en función de la distancia (fig. 7.58). Inicialmente la curva tiende a un trazado ascendente, ya que

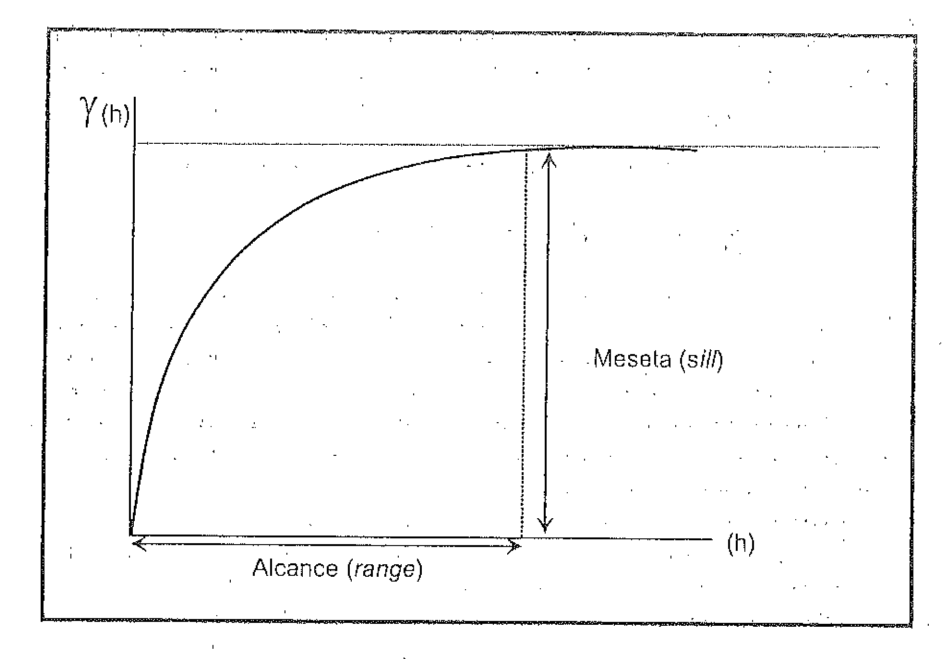


Fig. 7.58 - *Características de un semi-variograma típico*

al considerar píxeles cada vez más alejados la varianza aumenta. Sin embargo llega un momento en que se estabiliza, de tal forma que al incrementarse el radio de cálculo no aumenta la varianza significativamente. Esa distancia crítica se denomina alcance (*range*), y el valor al que se estabiliza la varianza, meseta (*sill*). Alcance y meseta son de gran interés para entender la estructura espacial de una imagen. Cuanto mayor contraste espacial presente, tanto el rango como la meseta tenderán a ser mayores. La proporción en la que varía una y otra depende de la disposición del mosaico paisajístico de la imagen.

En un trabajo de gran interés sobre discriminación de morfología forestal, se calculó el semi-variograma para varias imágenes obtenidas por videografía (con resolución de 1 m) sobre diversas plantaciones de coníferas. Los autores del estudio observaron que el alcance estaba directamente relacionado con la anchura de la copa —siendo mayor para las parcelas con árboles añejos, muy desarrollados—, mientras la meseta hacía referencia a la estratificación del dosel vegetal (Cohen et al., 1990). Conviene considerar que estas observaciones dependen directamente de la resolución de la imagen y, más en concreto, de la relación entre el tamaño de los objetos que se estudian (en este caso, la anchura de las copas) y el tamaño del píxel. De hecho, estos autores comprobaron cómo las imágenes de vídeo reducían notablemente su capacidad para discriminar rasgos espaciales al degradarse a 10 m, la resolución del canal pancromático del SPOT, mientras no permitían deducir una relación significativa entre semi-variogramas y características del dosel forestal al degradarse a la resolución

del Landsat-TM (Cohen et al., 1990). En este sentido, el semi-variograma se ha comprobado que resulta de gran interés para describir las relaciones entre el tamaño de los objetos y la resolución espacial del sensor, encontrándose que el máximo de varianza local se produce entre ½ y ¾ del tamaño medio de los objetos (Woodcock y Strahler, 1987). En estudiós teóricos y empíricos, también se ha observado que la altura del semi-variograma se relaciona con la densidad de la cubierta y el alcance con el tamaño de los objetos (Woodcock et al., 1988a y 1988b).

En consecuencia, el semi-variograma también ayuda a seleccionar la resolución óptima para abordar un determinado estudio, facilita el diseño de redes de medida *in situ* y de campañas de muestreo, al proporcionarnos una imagen de la distancia máxima a la cual los ND de la imagen se parecen excesivamente entre sí (Caselles, 1987; Chica, 1988). Asimismo, puede aplicarse al estudio de la estructura espacial de los errores, ya sean debidos a la clasificación temática (Congalton, 1988a), ya al registro geométrico (Townshend et al., 1992).

Respecto a los métodos que se basan en ventanas móviles y generan una nueva imagen de textura, podemos citar las siguientes:

(v) Desviación típica local. Se calcula como la dispersión de los ND de una ventana de píxeles en relación con su promedio. Esta medida resulta muy sencilla y se ha comprobado eficaz en el inventario forestal, como indicador de la densidad y homogeneidad de especies, lográndose significativas mejoras frente a clasificaciones sólo espectrales (Strahler y Logan, 1978; Strahler, 1984).

(vi) Diferencias absolutas entre los ND máximos y mínimos de la ventana considerada:

$$T = |ND_{max,i} - ND_{min,i}| \qquad [7.76]$$

siendo i cualquiera de los píxeles adyacentes al central de la ventana. Este sencilla medida se ha empleado para estimar la textura en zonas de praderas afectadas por distintos procesos ambientales (Briggs y Nellis, 1991). Gracias también a estas medidas de textura ha sido posible discriminar entre frutales de regadío y caducifolias, empleando las bandas TM3 y TM4 (Gordon y Philipson, 1986).

(vii) Entropía. Se define como la relación entre la frecuencia de un determinado ND y la frecuencia máxima esperable en la ventana de píxeles considerada:

$$Ent = \sum_{i=0,p} \frac{F_i}{n} \ln \frac{F_i}{n} \qquad [7.77]$$

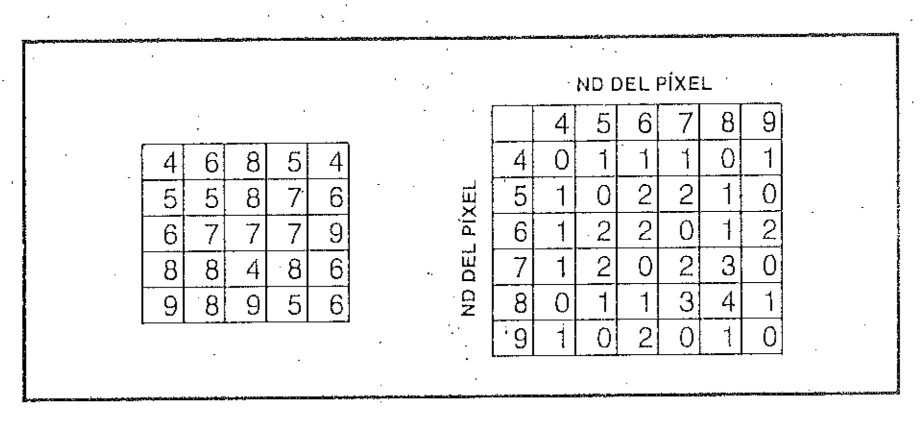
donde F_i indica la frecuencia de un determinado ND en la ventana, p el rango de ND en la imagen (256 para una imagen de 8 bits) y n el número de píxeles en la ventana. Esta medida se ha utilizado en la clasificación de áreas urbanas (Gong et al., 1992).

(viii) Medidas sobre la matriz de coincidencias. Se trata de una matriz cuadrada, en la que se incluye la frecuencia relativa (f_i/n) de cada combinación espacial entre el ND_i y el ND_j (esto es, cuando ND_i es contiguo a ND_j[11]). Para simplificar el cálculo, suele reducirse el rango original de la imagen (256 ND, de 0 a 255), compactándolo en un menor número (64 ó 16), y se promedian las conexiones posibles en las cuatro direcciones (fig. 7.59). Sobre esa matriz de coincidencias pueden calcularse algunas medidas de textura como la matriz de probabilidad de cambio en los ND (Moller-Jensen, 1990), o el segundo momento angular, SMA (Gong et al., 1992):

$$SMA = \sum_{i=0,p} \sum_{j=0,p} (C_{i,j})^2 \qquad [7.78]$$

donde $C_{i,j}$ indica la posición i, j de la matriz de coincidencias, y p el número de ND que forman esa matriz. En definitiva, C mide la probabilidad de que un ND con un valor i sea contiguo a otro con un valor j. Estas medidas se han demostrado de gran interés en aplicaciones urbanas.

(ix) Dimensión textural. Las medidas de la matriz de coincidencias son de gran interés, pero presentan algunos problemas, como estar influidas por el contraste tonal de la imagen (y no sólo por el espacial), y resultar algo subjetiva la decisión sobre la distancia máxima para considerar dos píxeles como contiguos (Wang y He, 1990). Para solventar estos problemas, otros autores proponen una medida alternativa basada en la llamada unidad de textura, definida a partir de una



4	6	8	5	4
5	5	8	7	6
6	7	7	7	9
8	8	4	8	6
9	8	9	5	6

ND DEL PÍXEL (columnas) / ND DEL PÍXEL (filas)

	4	5	6	7	8	9
4	0	1	1	1	0	1
5	1	0	2	2	1	0
6	1	2	2	0	1	2
7	1	2	0	2	3	0
8	0	1	1	3	4	1
9	1	0	2	0	1	0

Fig. 7.59 - *Ejemplo de una matriz de coincidencias. En la parte izquierda, la imagen original; a la derecha, la tabla indica el número de veces que un determinado ND aparece al lado de otro (tomado de PCI, 1994).*

[11] Esa contigüidad suele definirse en una distancia de 1 píxel, en x e y, pero podrían considerarse otros criterios.

ventana de 3 x 3 píxeles, el central y los ocho circundantes. El valor de esta unidad se calcula a partir de la siguiente fórmula (Wang y He, 1990):

$$NUT = \sum_{j=1,8} 3^{i-1} E_i \qquad [7.79]$$

donde NUT indica número de unidad de textura y E_i es la medida de textura para cada píxel de la ventana. E_i vale 0 cuando el ND de ese píxel es inferior al ND del píxel central de la ventana, 1 cuando es igual y 2 cuando es superior (fig. 7.60). Los NUT pueden ordenarse de varias formas, dependiendo de qué píxel de la ventana inicie el cálculo y en qué sentido se cuente (a favor o en contra de las agujas del reloj). En cualquier caso, el NUT puede variar entre 0 y 6250 (3^8). A partir de ese valor puede calcularse el denominado "espectro de textura"; se trata de un histograma que indica la frecuencia de píxeles de la imagen en cada NUT, y permite observar los rasgos globales de su contraste espacial. A partir de él se han sugerido calcular algunos índices, como el de simetría entre los valores más bajos y más altos del espectro, o el grado de dirección que presentan las texturas (Wang y He, 1990). Se ha comprobado que estas medidas permiten distinguir algunas cubiertas con escaso contraste espectral, como tipos de minerales o de especies forestales. En este segundo caso, se observó una notable correlación entre los valores de textura derivados a partir de una imagen pancromática SPOT, y algunos parámetros medidos en terreno como el diámetro de copa, altura del árbol, área basal, edad y diámetro a la altura del pecho (Cohen y Spies, 1992).

La figura 7.61 incluye la información textural correspondiente a la banda 3 de la imagen de Arganda. Se trata del contraste obtenido a partir de una matriz de coincidencias (en este caso, el rango original se ha comprimido a 64 ND para facilitar el cálculo). Como puede observarse, esta imagen de textura pone de manifiesto los contrastes espaciales presentes en la imagen, que son más intensos allí donde la ocupación del suelo está más compartida. En el valle del Jarama destacan las zonas de regadío y de explotación de graveras, aunque resaltan primordialmente las zonas urbanas.

4	6	8	5	4
5	5	8	7	6
6	7	7	7	9
8	8	4	8	6
9	8	9	5	6

0	2	2
1		2
2	2	2

Valor de E_i

Unidad de Textura para el píxel (2,2):

$NUT = 3^0 \cdot 0 + 3^1 \cdot 2 + 3^2 \cdot 2 + 3^3 \cdot 2 + 3^4 \cdot 2 + 3^5 \cdot 2 + 3^6 \cdot 2 + 3^7 \cdot 1 = 4371$

Fig. 7.60 - *Cálculo de la unidad de textura para la ventana de la figura 7.59*



Fig. 7.61 - *Medida del contraste a partir de la matriz de co-ocurrencia. Banda 3.*

7.4.2.2. Medidas de la variación espacial en imágenes clasificadas

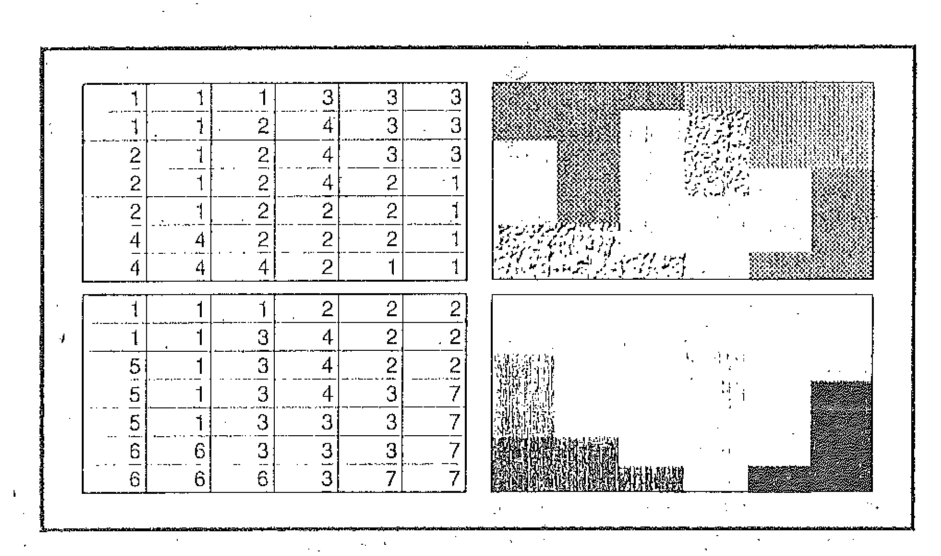
En este caso, partimos de archivos en los que el ND de cada píxel es una etiqueta que identifica la categoría a la que se ha asignado. En consecuencia, aunque se trata de una imagen digital, no pueden aplicarse sobre ella operaciones aritméticas, ya que el ND no indica una relación cuantitativa, sino categórica.

En el campo de ecología del paisaje se han propuesto numerosos índices para medir la estructura espacial de un determinado territorio (O'Neill et al., 1988; Riitters et al., 1995). Algunos de ellos se aplican sobre toda la imagen, como los señalados para imágenes cuantitativas; otros, se calculan para ventanas móviles, normalmente de 3 x 3 píxeles, que se van desplazando sobre la imagen. Entre los primeros cabe destacar los siguientes:

(i) Densidad de manchas, calculada como el número de manchas por unidad de superficie. Como antes indicamos una mancha (*patch*) indica un conjunto de píxeles contiguos con la misma categoría. Mediante técnicas de agregación espacial (*clumping*), se etiquetan con el mismo número aquellos píxeles que cuenten con la misma categoría temática y sean contiguos. En definitiva, se trata de generar una nueva imagen en donde se identifiquen las manchas de la misma categoría, o dicho de otra forma, se obtenga una numeración del mosaico espacial presente en la escena (fig. 7.62). Esta técnica es bastante común en el entorno de los SIG, en donde se aplica a mapas temáticos con pocas categorías, pero resulta menos frecuente en el tratamiento de imágenes. Habitualmente se calcula para imágenes clasificadas, pero también podría hacerse sobre alguna imagen continua, por ejemplo índices de vegetación o temperatura, previamente segmentada en un número determinado de intervalos (Chuvieco, 1996).

El cociente entre el número de manchas y la superficie de la imagen nos ofrece una primera valoración sobre la complejidad paisajística de la zona (Dillworth et al., 1994). Un área con una densidad alta de manchas indicará un espacio muy fragmentado.

(ii) Tamaño. Además del número, también parece interesante considerar el área media de las manchas, lo que puede fácilmente calcularse a partir de un simple histograma de la imagen de manchas (número de píxeles en cada parcela). Cuanto mayor sea el área media, más grandes las manchas que forman el mosaico vegetal.



1	1	1	3	3	3
1	1	2	4	3	3
2	1	2	4	3	3
2	1	2	4	2	1
2	1	2	2	2	1
4	4	2	2	2	1
4	4	4	2	1	1

1	1	1	2	2	2
1	1	3	4	2	2
5	1	3	4	2	2
5	1	3	4	3	7
5	1	3	3	3	7
6	6	3	3	3	7
6	6	6	3	7	7

Fig. 7.62 - *En la parte superior, códigos de la clasificación. En la inferior, los correspondientes a las distintas manchas para la misma clasificación.*

(iii) Compacidad. Se ha puesto de manifiesto por varios autores el interés de conocer la forma de las manchas presentes en la zona, ya que con la misma superficie un polígono más alargado presenta mayores opciones a la transmisión de especies y menores obstáculos a la influencia mutua entre las manchas que divide. Los índices de compacidad suelen basarse en la relación entre área y perímetro. Éste es el caso del índice F (Gulinck et al., 1991):

$$F = \frac{4\pi A 100}{P^2} \qquad [7.80]$$

donde A indica el área y P el perímetro.

Otros índices se basan en la relación entre la forma de una mancha determinada y la de una figura geométrica. Así se define el índice de compacidad (C) por relación a un círculo:

$$C = \sqrt{\frac{Ap}{Ac}} \qquad [7.81]$$

donde Ap indica el área del polígono y Ac el correspondiente a un círculo que tuviera el mismo perímetro de ese polígono. Al aumentar C el polígono sería más compacto, menos alargado.

(iv) Dimensión fractal. Como ya hemos indicado, esta medida intenta cuantificar la complejidad de las formas de líneas, superficies o volúmenes. En caso de tratarse de imágenes clasificadas, su cálculo es más sencillo que con las originales, pues se basa en la relación entre el perímetro y el área de los polígonos que forman el mosaico paisajístico. Una forma sencilla de calcular la dimensión fractal (D), de cada polígono, es la siguiente expresión (Ripple et al., 1991):

$$P \approx A^{D/2} \qquad [7.82]$$

donde A indica el área y P el perímetro. El valor medio del conjunto de la imagen se obtendría simplemente promediando D para todos los polígonos que la formen. Otros autores proponen calcular la dimensión para el conjunto de un mapa o imagen clasificada, con objeto de comparar la complejidad geométrica de las manchas que forman el mosaico paisajístico (O'Neill et al., 1988). Bajo esta óptica la dimensión fractal (D) puede calcularse de acuerdo a:

$$D = 2b$$

siendo b la pendiente de la recta de regresión entre los logaritmos del área (A) y el perímetro (P) de los polígonos presentes en el mapa:

$$\log \hat{P} = a + b \log A \qquad [7.83]$$

Algunos autores han observado que la dimensión fractal está directamente asociada con la complejidad paisajística. En un amplio sector del Este de EE.UU. se comprobó que D ofrecía una valoración numérica de los distintos patrones de uso del suelo; cuando D era pequeño, indicaba que las formas resultaban bastante geométricas, lo que apuntaba a una utilización humana del territorio, frente a otros sectores con mayor presencia de espacios naturales, en donde D ofrecía un valor mucho más alto (O'Neill et al., 1988). Asimismo, se ha comprobado que la dimensión fractal aumenta al disminuirse la resolución espacial del sensor, especialmente si la imagen presenta escasa heterogeneidad inicial (Benson y MacKenzie, 1995).

(v) Dispersión. Hace referencia a la fragmentación de la imagen, y se calcula como la distancia promedio entre los centroides de las distintas manchas (Ripple et al., 1991). La fragmentación del paisaje es un aspecto de gran importancia en la resistencia al movimiento de especies.

Hasta aquí las medidas aplicables al conjunto de las manchas que forman el mosaico de cobertura. Junto a ellas, se pueden calcular otros índices para ventanas locales (normalmente de 3 x 3 píxeles) que se van desplazando consecutivamente en la imagen, midiendo la variabilidad local en las categorías. Los índices más conocidos son los siguientes:

(vi) Diversidad. Indica la variedad de categorías que pueden encontrarse en una ventana de la imagen (Turner et al., 1989):

$$D = - \Sigma_{k=1,m}\, p_k \ln (p_k) \qquad [7.84]$$

donde p_k corresponde a la proporción de la categoría k en la ventana considerada y m al número de categorías presentes en esa ventana. Cuanto mayor sea la diversidad media, mayor variedad espacial en la distribución de las cubiertas, o, dicho de otra forma, la zona presenta un mosaico más variado (fig. 7.63). La diversidad está directamente relacionada con la escala de las imágenes, siendo menor al bajar la resolución (Turner et al., 1994).

(vi) Dominancia. Representa la desviación del valor calculado respecto a la máxima diversidad (O'Neill et al., 1988):

$$Do = \ln (m) + \Sigma_{k=1,m}\, p_k \ln (p_k) \qquad [7.85]$$

con la misma significación de la fórmula anterior. Cuanto más alto es el valor del índice, mayor predominio tiene una categoría sobre las otras en esa ventana (fig. 7.63).

(vii) Contagio. Intenta medir el grado de adyacencia entre categorías frente al máximo posible (O'Neill et al., 1988; Li y Reinolds, 1993):

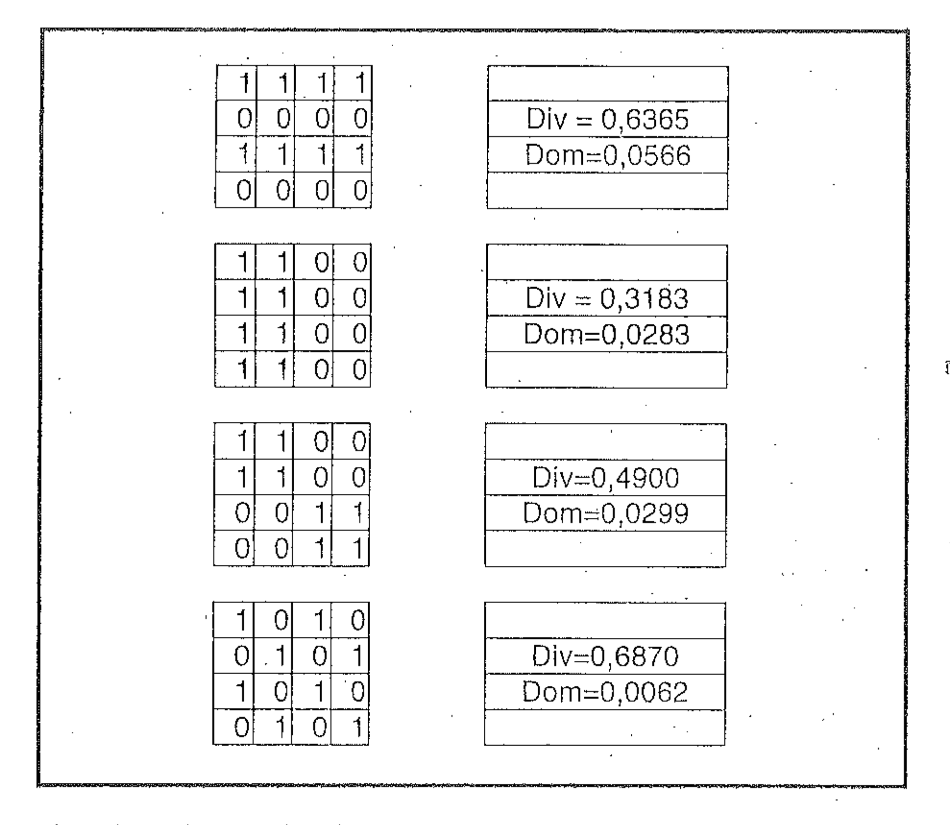


Fig. 7.63 - *Valores medios de diversidad y dominancia para imágenes simuladas con dos categorías. Se varía la distribución pero no la densidad.*

$$Con = 2 \ln (m) + \Sigma_{i=1,m} \Sigma_{k=1,m}\, p_{ik} \ln (p_{ik}) \qquad [7.86]$$

donde p_{ik} indica la proporción de píxeles en esa ventana en donde la categoría **i** es limítrofe a la categoría **k**. Cuando más alto es el valor del contagio, más grandes y contiguas son las manchas del mosaico.

(viii) Matriz de comparación binaria (MCB). También se dirige a medir la contigüidad de las categorías presentes en una ventana. Se define como (Murphy, 1985):

$$BCM = \frac{m^2 - \Sigma_{i=1,m} f_i^2}{2} \qquad [7.87]$$

donde f_i indica la frecuencia de aparición de la categoría **i** y **m** el número de categorías. El índice MCB aumenta cuanto mayor es la complejidad espacial, pues considera tanto el número de categorías como su frecuencia. Sin embargo, no tiene en cuenta si las categorías son contiguas o no, por lo que el autor propone

complementarlo con algún indicador del número de cambios de categoría que se producen en la ventana considerada.

7.4.3. Dinámica de la estructura espacial del paisaje

Las medidas anteriormente revisadas pueden utilizarse tanto para comparar diversos paisajes, como para estudiar la evolución de una zona determinada. En este caso, se trataría de estudiar cómo se transforma la configuración espacial del territorio como resultado de ciertos cambios, debidos a la actividad humana (efecto de ciertas políticas sobre el uso del suelo), o de algún evento esporádico (inundaciones, erupciones volcánicas o incendios). Con este enfoque multitemporal se han abordado numerosos trabajos en ecología del paisaje (Reinhardt y Ringleb, 1990; O'Neill et al., 1988; Ripple et al., 1991; Turner et al., 1994). La explicación de esos cambios se basa en factores de índole socio-económico, o en las propias variables geográficas (suelo, topografía, litología, etc.: Pastor y Broshart, 1990).

Un marco para la aplicación de estas medidas a imágenes de satélite es el seguimiento del efecto del fuego sobre la estructura espacial del paisaje (Chuvieco, 1996), tomando como ejemplo el incendio de Buñol, antes comentado. Para evaluar este efecto paisajístico a distintas escalas, se compararon imágenes Landsat-TM y NOAA-AVHRR, adquiridas antes y después del fuego. La figura 7.64 recoge los índices de vegetación correspondientes a estas imágenes. Junto al evidente efecto de la resolución espacial, se muestra una tendencia similar entre ambas imágenes, mostrándose con claridad el patrón del área quemada.

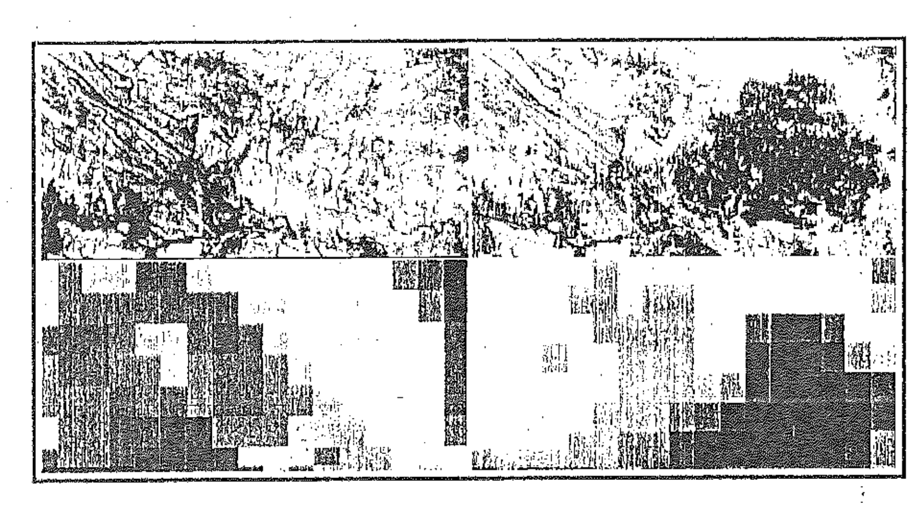


Fig. 7.64 - *Índices de vegetación de las imágenes Landsat-TM (arriba) y AVHRR (abajo) sobre el incendio de Buñol. Antes del incendio (izquierda), después (derecha).*

Para homogeneizar las medidas antes comentadas y evitar el efecto subjetivo de una clasificación, se aplicaron directamente sobre los índices de vegetación (NDVI), calculados para ambos sensores, a partir de los valores de reflectividad. Sobre las imágenes de los NDVI se calculó la media de unos perfiles y el índice de autocorrelación de Moran. Tras segmentar los NDVI a 12, 10, 8, 5 y 3 intervalos[12], calculamos sobre ellos el número de manchas, su compacidad, la diversidad promedio y la dimensión fractal. Los cálculos se realizaron de la misma forma para las imágenes TM y AVHRR.

Las tablas 7.15 y 7.16 recogen los resultados de esta comparación. Como puede observarse, prácticamente en todas las medidas calculadas, la imagen posterior al fuego presenta una mayor homogeneidad espacial, tanto en las imágenes TM como en las AVHRR. La única excepción es la desviación típica del perfil, que aumenta tras el incendio en la imagen AVHRR. Este dato no tiene una gran relevancia, ya que puede ser originado por ruido, puesto que esa línea sólo tiene 15 píxeles AVHRR, lo que resulta poco significativo.

	TM - Antes del fuego	TM - Después del fuego	AVHRR - Antes del fuego	AVHRR - Después del fuego
I de Moran	0,871	0,919	0,714	0,90
Desviación típica del perfil	11,66	10,14	2,73	3,77
Media textural	18,05	15,68	7,59	6,56

Tabla 7.15 - *Variación de la estructura del paisaje a consecuencia del fuego (medidas aplicadas a las imágenes de los NDVI)*

	TM - Antes del fuego	TM - Después del fuego	AVHRR - Antes del fuego	AVHRR - Después del fuego
Área media	47,48	84,01	1060,00	1986,00
Compacidad media	0,289	0,171	0,57	0,58
Desviación típica de la compacidad	0,458	0,210	0,19	0,15
Diversidad media	0,766	0,491	1,06	0,81
Dimensión fractal	2,250	2,272	2,26	2,29

Tabla 7.16 - *Variación de la estructura del paisaje a consecuencia del fuego (medidas aplicadas a 8 intervalos de NDVI)*

[12] Fue necesario segmentar la imagen TM del NDVI porque, con el rango original de categorías, (250) el número de manchas que se obtenían excedía la memoria dinámica del programa.

El índice de Moran indica una mayor homogeneidad para la imagen posterior al fuego. El valor de la autocorrelación espacial aumenta tanto en la TM, como en la AVHRR, de forma más brusca en esta última (un 125 % frente a un 105 % de la imagen TM). Por el contrario, disminuye la textura media, obtenida a partir de la matriz de coincidencias antes comentada, lo que también indica una mayor homogeneidad después del fuego. La figura 7.65 incluye el semi-variograma de las imágenes TM anterior y posterior al fuego. Este gráfico se construyó a partir de una muestra aleatoria de 1.000 píxeles, considerando un promedio de todas las direcciones. En el trazado general, se observa cómo la imagen posterior

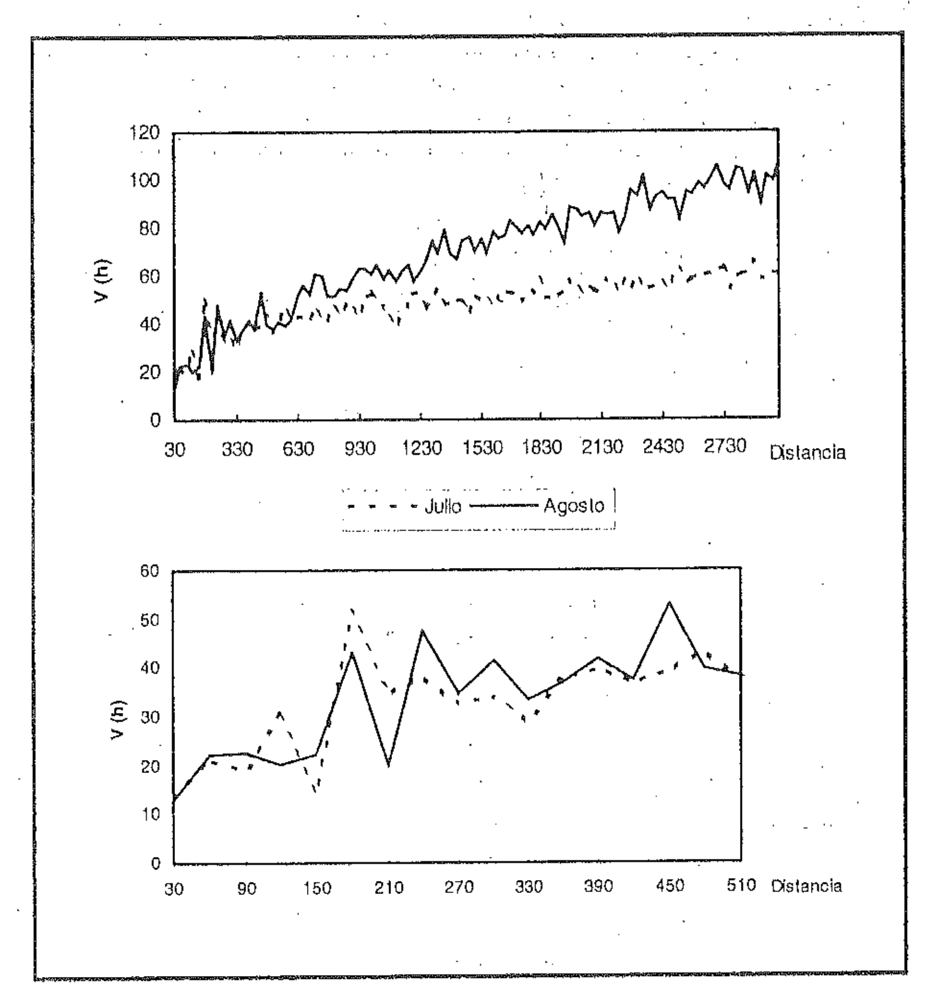


Fig. 7.65 - *Semi-variogramas para las imágenes TM anterior (julio) y posterior (agosto) al incendio de Buñol. En la parte inferior se incluye un detalle correspondiente a las distancias más cortas.*

al incendio ofrece una mayor varianza, especialmente para las distancias superiores a 500 metros. Esto indica que hay mayor contraste tonal en la imagen de agosto, como consecuencia de la presencia de un gran sector quemado. Podría deducirse, por tanto, que la imagen post-incendio es más heterogénea espacialmente, contradiciendo las conclusiones que proporcionan otro tipo de índices. Sin embargo, esta mayor heterogeneidad no es tan clara para las distancias más cortas, por debajo de 210 metros (7 píxeles), en las que la imagen de julio equipara o superar la varianza espacial de la de agosto. Podríamos concluir, en este caso, que la aparición de una mancha quemada incrementa la textura espacial para el conjunto del mosaico, pero no para las relaciones de vecindad, que aparecen como más similares a consecuencia del fuego.

Respecto al número de manchas, en todas las segmentaciones de la escala original del NDVI que hemos realizado, se observa una disminución para las imágenes posteriores al fuego (figura 7.66). Para los datos TM la caída más brusca entre las dos fechas se registra con una segmentación en 12 niveles de NDVI. En esas imágenes, se observa una reducción del 58 % en el número de manchas en la imagen posterior al fuego.

Para la imagen AVHRR la reducción del número de manchas también es consistente, tanto para los 250 valores originales del NDVI, como para las distintas segmentaciones (de 12 a 3 grupos). El máximo decremento ocurre con 10 rangos de NDVI, en donde se pierde el 42 % del número de manchas previo al incendio.

Para el caso concreto de segmentar las imágenes en 8 niveles de NDVI, calculamos algunas medidas de compacidad y diversidad. La superficie media de

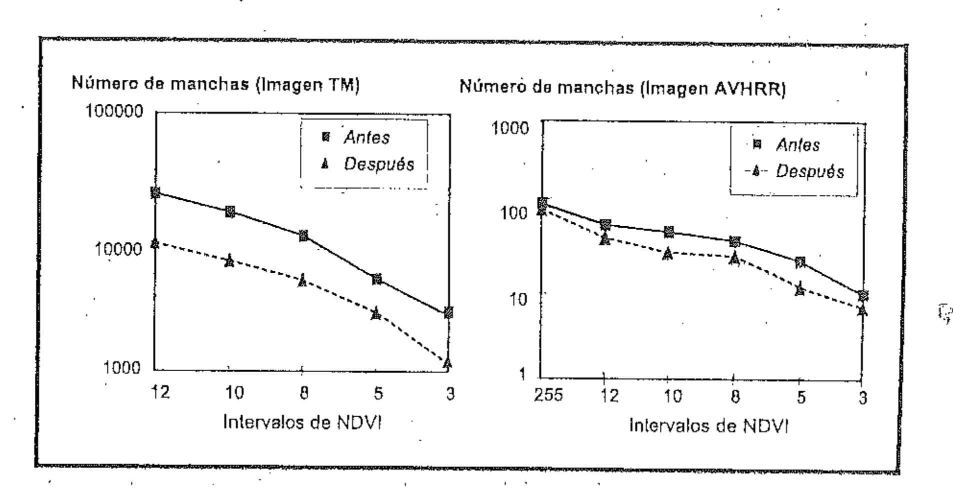


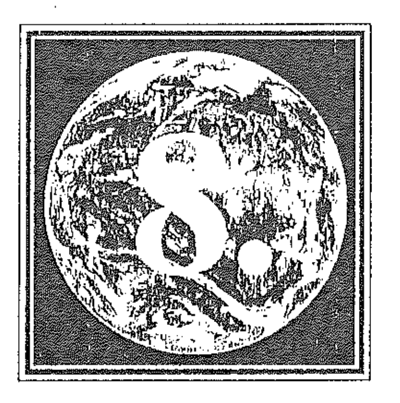
Fig. 7.66 - *Disminución del número de manchas a consecuencia del efecto homogeneizador del fuego.*

las manchas, por ejemplo, indica la formación de un mosaico más homogéneo en la imagen TM de agosto, que casi duplica la superficie media por mancha previa al fuego. En otras palabras, los polígonos de vegetación similar tienden a ser mayores después del fuego. La imagen AVHRR ofrece la misma tendencia que la TM, con un notable aumento de la superficie media para la imagen posterior al fuego.

En cuanto a la compacidad, para el caso concreto de los 8 rangos de NDVI, se observa una disminución del valor medio a consecuencia del incendio, de modo más claro en la imagen TM que, gracias a su mayor resolución, ofrece mejores posibilidades para el análisis de formas. Los agregados, en consecuencia, tienden a ser más alargados, probablemente por el efecto del relieve en la dispersión del fuego. La desviación típica de la compacidad también es menor después del fuego, indicando una mayor homogeneidad en la forma de los grupos.

La geometría fractal se incrementa tras el fuego, tanto para la imagen TM como para la AVHRR, indicando que los polígonos son más irregulares a consecuencia del incendio, lo que es coherente con la disminución de la compacidad.

Finalmente, la diversidad media de las manchas es también mucho menor tras el incendio, confirmando una vez más el efecto homogeneizador del fuego. Este efecto se observa tanto en alta como en baja resolución espacial, aunque en ésta resulta menos evidente.



Verificación de Resultados

«La vida se nos da,
y la merecemos dándola.»

[Rabindranath Tagore, *Gitangali*]

El producto final de una clasificación, ya sea ésta visual o digital, es un mapa temático, en donde el territorio de estudio se encuentra dividido en una serie de unidades espaciales, de significado coherente con la leyenda de trabajo. Ese documento puede integrarse con otras variables geográficas, para análisis posteriores, o servir como punto final del proyecto.

En uno y otro caso, habitualmente se asume que el documento obtenido es completamente fiable. Dicho de otro modo, se considera que la cartografía realizada se ajusta perfectamente a la realidad. Tal asunción es, casi siempre, gratuita. Toda clasificación conlleva un cierto margen de error, en función de la calidad de los datos o de la rigurosidad del método empleado. Por ello, resulta obligado aplicar algún procedimiento de verificación, que permita cuantificar ese error y, en función de él, valorar la calidad final del trabajo y su aplicabilidad operativa.

Los métodos de verificación estadística se han desarrollado en los últimos años, en el contexto del tratamiento digital de imágenes espaciales. Esto no quiere decir que sólo sean aplicables a este método de interpretación, puesto que pueden generalizarse a cualquier tipo de cartografía temática, sea digital o no, a partir de la teledetección espacial o de imágenes aéreas. Más aún, cualquier documento temático debería incluir este proceso de verificación, pues permite al usuario del mapa valorar su grado de acuerdo con la realidad, o, dicho de otro modo, el riesgo que asume al tomar decisiones sobre la información representada en ese mapa.

8.1. Fuentes de error en una clasificación temática

La fiabilidad de un documento cartográfico depende, principalmente, de la metodología adoptada y de la calidad de los datos sobre los que se aplica. La

interpretación visual implica un mayor grado de supervisión que el tratamiento digital de imágenes, y se realiza, normalmente, a menor escala, lo que supone manejar una leyenda menos detallada. La exactitud de uno y otro método también está influida por los recursos externos aplicados sobre la interpretación, como es el caso de la experiencia del intérprete o de la calidad del equipo de tratamiento con que se cuente.

En suma, podemos agrupar los factores de fiabilidad, o si se prefiere las fuentes de error, de una clasificación en varios grupos, en razón del elemento principal con que se relacionan. De esta forma se distinguen los siguientes tipos de errores: (i) relacionados con el terreno que se analiza, (ii) con el nivel de precisión requerido en la leyenda, (iii) con la adquisición de la imagen, y (iv) con factores medio-ambientales externos (Campbell, 1987; Link y Struve, 1978; Wang y Howarth, 1993):

8.1.1. Estructura del territorio

Los errores relacionados con la estructura del territorio, incluyen aquellas confusiones derivadas de la disposición espacial con que se presentan las cubiertas objeto de estudio. Aquí pueden incluirse aspectos como la forma, orientación y, sobre todo, tamaño de las parcelas; también el contraste espacial entre cubiertas vecinas, y el grado de mezcla en los distintos tipos de cubierta.

El efecto de la morfología parcelaria resulta especialmente sensible en aquellas regiones que han sufrido una ocupación milenaria del territorio. Esto origina, con bastante frecuencia, solares de muy pequeña extensión, inferior incluso al tamaño del píxel. Como consecuencia, el sensor detecta una señal radiométrica promedio entre dos o más cubiertas, haciendo prácticamente imposible su discriminación (fig. 8.1). El efecto, conocido como error de frontera, es muy habitual en aplicaciones agrícolas, especialmente en los paisajes con parcelamiento muy minucioso.

Estrechamente conectado con este problema, se encuentra el efecto de la disposición espacial de los tipos de cubierta. Si existe un claro contraste espectral entre cubiertas vecinas, éstas serán más fácilmente separables que si ofrecen un comportamiento similar, ya que el sensor, al cambiar de una a otra, podrá detectar una señal suficientemente discrepante para interpretarla como perteneciente a una cubierta distinta (fig. 8.2). Por ejemplo, un núcleo rural rodeado de cultivos en regadío, resulta más fácilmente discriminable que si se enmarca en un sector cerealista de secano, ya que esta cubierta cuenta con una respuesta más similar a los núcleos rurales, especialmente cuando se trabaja con imágenes estivales.

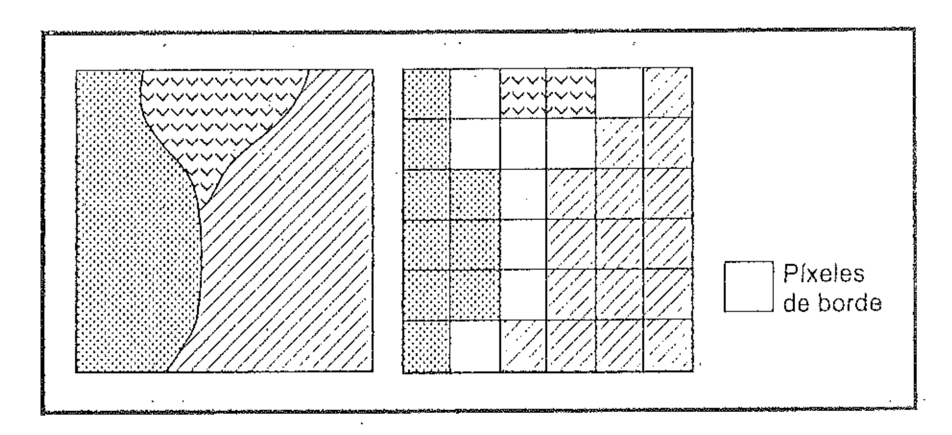


Fig. 8.1 - *Consecuencias del error de frontera. Los píxeles de borde registrarán una señal radiométrica intermedia entre dos o más tipos de cobertura.*

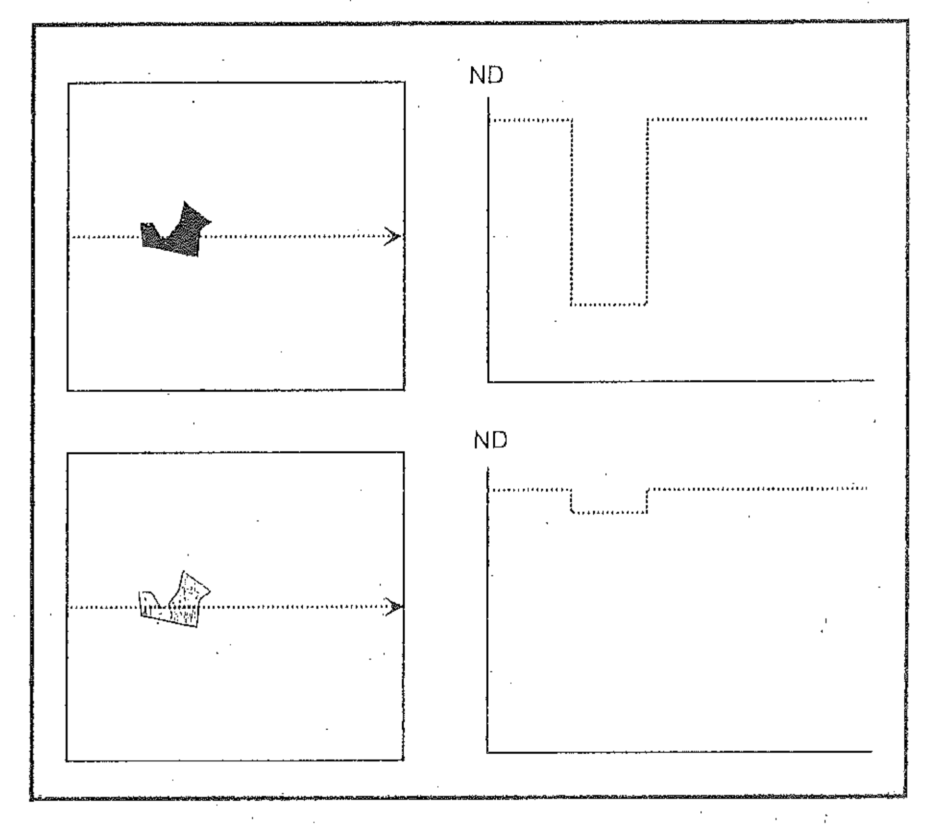


Fig. 8.2 - *El efecto del contraste radiométrico entre cubiertas vecinas se observa en los perfiles trazados sobre un área de alto y bajo contraste.*

En cuanto al grado de mezcla entre cubiertas, puede afirmarse que supone un problema casi insoluble, al menos cuando se aborda el trabajo sólo a partir del valor radiométrico de cada píxel. Otros criterios más abstractos, como estructura, textura o asociación, comunes en análisis visual, pueden paliar ese problema, si bien la distinción de rasgos de tamaño inferior al del píxel sólo se realiza por aproximación. Este efecto es especialmente evidente en cubiertas agrícolas, cuando se produce asociación de cultivos en la misma parcela. En el caso de categorías forestales, implica la combinación entre diversas especies de árboles, y de éstas con matorral y pastizales.

La influencia del tipo de paisaje en los errores de la clasificación se ha puesto en evidencia al estudiar la distribución espacial de los patrones de error. Estos trabajos han demostrado que existe una auto-correlación espacial significativa entre los píxeles mal clasificados (Congalton, 1988a). Dicho de otra forma, la aparición de un píxel erróneo está estrechamente relacionada con su ubicación espacial, ya que los errores están notablemente influidos por la estructura del territorio. Esa tendencia a la formación de áreas de error es más clara en aquellas imágenes que muestran menor complejidad espacial; esto es, con patrones de distribución más sistemáticos, como ocurre en el caso de las áreas agrícolas (fig. 8.3). Por su parte, en los paisajes más complejos, como son las áreas urbanas o los espacios de vegetación natural, los errores son menos sistemáticos.

8.1.2. Nivel de desagregación

Los errores relacionados con el nivel de desagregación de la leyenda son, en última instancia, fruto de una inadecuada selección de la misma, o de las imágenes más apropiadas para su consecución (4.1). En la mayor parte de los casos, el intento de establecer subdivisiones en una clase temática implica problemas de asignación, puesto que se pretenden discriminar cubiertas muy similares espectralmente. Por ejemplo, en un estudio sobre el Sur de Alemania, se comprobó cómo la combinación de las clases «baja densidad urbana» y «alta densidad urbana» en una clase común «urbana», aumentó la precisión de la cartografía final en un 83 %, mientras la inclusión de bosque, en lugar de bosque caducifolio y perennifolio incrementó la precisión a un 88 % (Schneider, 1980). Similares conclusiones se han extraído por otros autores, en el intento de establecer distintas densidades de edificación en zonas urbanas (Toll, 1984).

Este tipo de errores pueden comprobarse, con cierta facilidad, tras estudiar las confusiones más notorias detectadas en la clasificación. Caso de que exista una importante mezcla entre sub-clases, convendrá optar por categorías más generales, por métodos de interpretación más depurados, o por información auxiliar, que complete la disponible por el intérprete.

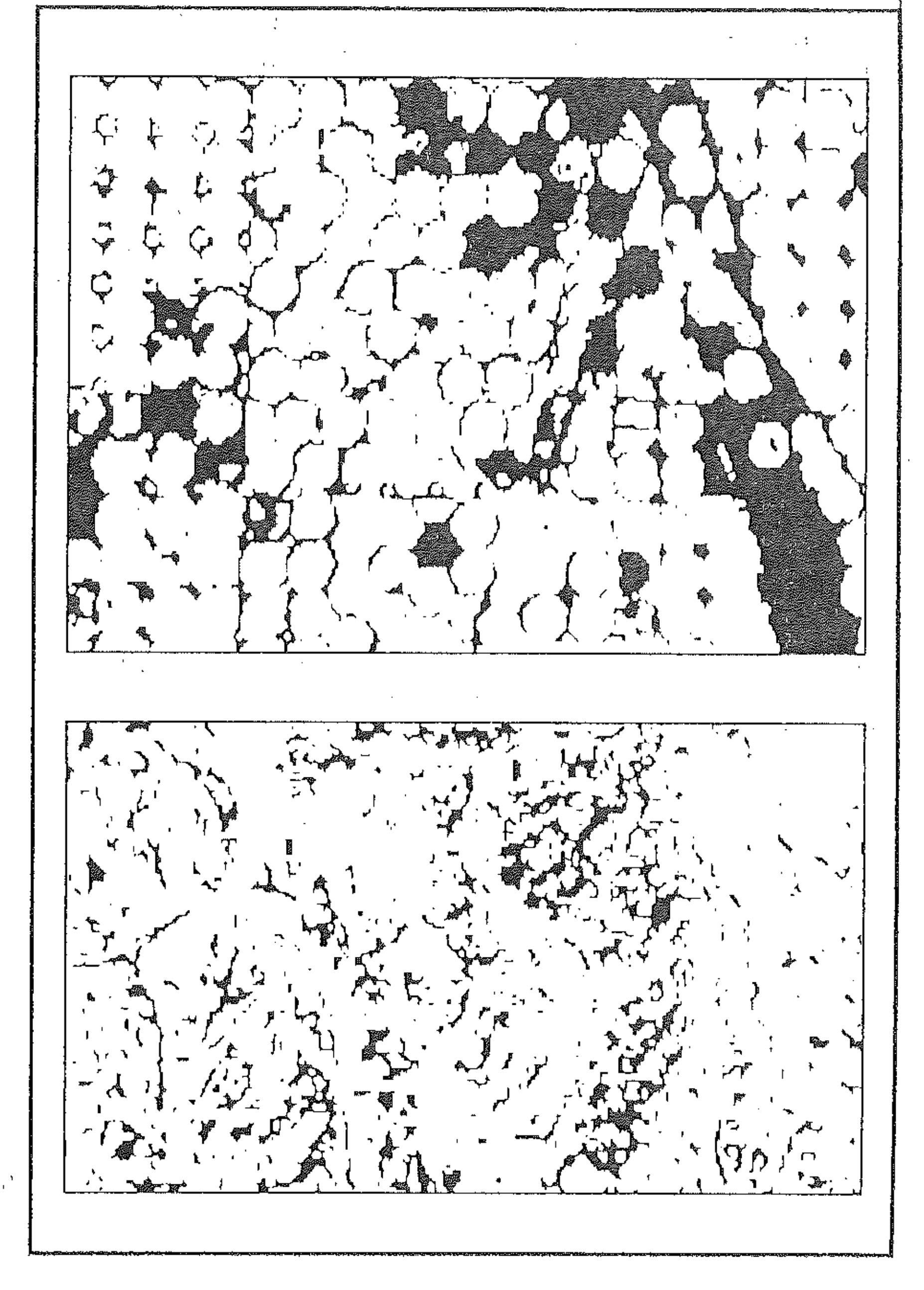


Fig. 8.3 - *Distribución espacial del error en las clasificaciones digitales. En la parte superior aparece una imagen correspondiente a una zona agrícola; en la inferior a un área forestal (Tomado de Congalton, 1984. Reproducida con permiso).*

8.1.3. Adquisición de la imagen

Los errores relacionados con la adquisición de la imagen ya se han analizado en anteriores capítulos (6.5.1). Hacen mención a problemas en el funcionamiento del sensor o de la plataforma, a la influencia atmosférica, o a fallos en los sistemas de recepción y/o grabación de la imagen.

En sentido amplio, podríamos incluir aquí también las confusiones derivadas de una incorrecta selección de la imagen. En el caso de las cubiertas vegetales, resulta muy conviene considerar su dinamismo estacional, de cara a establecer el período más apropiado para abordar su discriminación. Si la imagen se adquiere en una fecha inadecuada, es posible que aparezcan errores de asignación, de otro modo solventables. Por ejemplo, en imágenes de verano, pueden presentarse problemas para discriminar, digitalmente, núcleos rurales y parcelas cerealistas recién cosechadas. El problema se deriva de su comportamiento espectral, muy cercano en esas fechas, puesto que los tejados de estos núcleos suelen fabricarse con el mismo material del suelo agrícola. Evidentemente, esta confusión puede obviarse utilizando imágenes de primavera, cuando estos campos aparecen cultivados, mostrando un comportamiento muy distinto de las zonas edificadas.

En otro tipo de cubiertas esta discriminación resulta mucho más problemática, por cuanto sus componentes básicos son muy similares. El ejemplo más típico sería la confusión entre áreas residenciales y bosques caducifolios. Su comportamiento espectral resulta bastante parejo a lo largo del año, ya que la cubierta arbolada (similar en ambas categorías) es la más influyente en la generación de la señal detectada por el sensor. En este sentido, se evidencia la necesidad de contar con otros criterios de interpretación, como la textura o el contexto (5.2).

8.1.4. Condiciones medio-ambientales

Por último, podemos señalar un grupo de errores de asignación debidos a las condiciones medio-ambientales. Como ya hemos visto, la distinta orientación, pendiente, densidad y estado fenológico con que aparece una cubierta, implica una variabilidad espectral en torno al comportamiento tipo de esa categoría. Tal dispersión dificulta la caracterización espectral de una clase, provocando solapes y confusiones con categorías vecinas.

8.2. Medidas de la fiabilidad

La estimación de la exactitud alcanzada por el mapa puede realizarse por diversos criterios: (i) comparando el inventario de la clasificación con el obtenido por otras fuentes convencionales; (ii) estudiando la fiabilidad obtenida al clasificar las áreas de entrenamiento, y (iii) seleccionando unas áreas de verificación para las que se cuenta con la cubierta realmente presente en el suelo (fig. 8.4).

El método más sencillo para estimar la precisión conseguida por una mapa, se basa en calcular las diferencias entre el inventario ofrecido por la clasificación y por otras fuentes que se consideren fiables (estadísticas oficiales, cartografía de detalle, etc). Suponiendo al documento de referencia como plenamente fiable, esta medida sólo indica el porcentaje de error, pero no su localización sobre el mapa. Por otro lado, tampoco identifica las confusiones entre categorías que producen ese margen de error, además de que no siempre resulta sencillo ajustar la leyenda de la fuente convencional con la obtenida a partir de imágenes de satélite (GDTA-CEE, 1982).

Otra opción para verificar los resultados, consiste en clasificar los campos de entrenamiento (7.2.2), para comprobar si se ajustan correctamente a las categorías que pretenden definir. Se trata ésta de una medida de la fiabilidad un

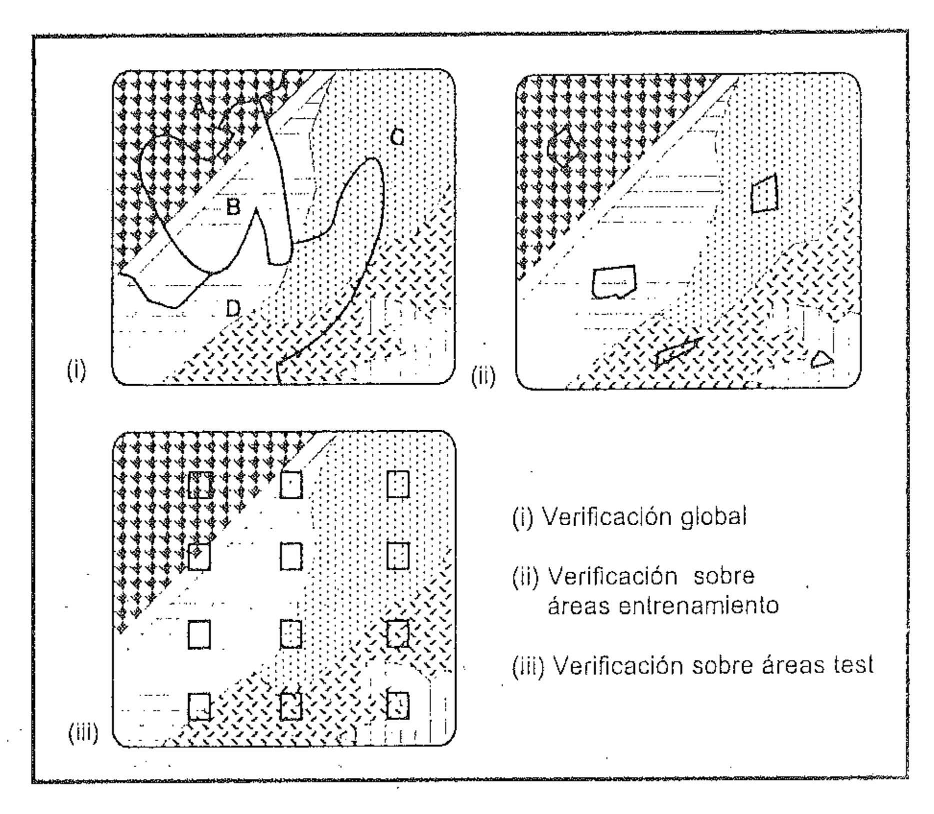


Fig. 8.4 - *Medidas de fiabilidad en una clasificación*

tanto sesgada. Si, como hemos visto, las áreas de entrenamiento sirven para definir estadísticamente a las distintas categorías, parece lógico que los píxeles incluidos en ellas tengan una mayor probabilidad de clasificación certera que el resto de los píxeles de la imagen. Ahora bien, aunque no puede calificarse como un criterio riguroso de validación, esta práctica resulta muy interesante para explorar la «pureza» de cada campo de entrenamiento, o, dicho de otro modo, la precisión con la que identifican a un determinado tipo de cubierta. Si los píxeles presentes en estas áreas se asignan a otras clases, conviene delimitar nuevos campos de entrenamiento y/o simplificar la leyenda de trabajo.

La tercera vía de trabajo consiste en seleccionar, con posterioridad a la clasificación, una serie de áreas test, que permitan obtener una medida independiente del acuerdo entre mapa y verdad-terreno. Este procedimiento pasa por realizar un muestreo del área de estudio, a fin de obtener las medidas de campo necesarias para verificar los resultados de la clasificación. Tal muestreo supone un coste adicional al proyecto, que no repercute en una mejora de su fiabilidad, sino sólo en la medida de ésta. Por ello, la preocupación por este tipo de estudios es relativamente reciente, aunque está extendiéndose en la comunidad científica. Es obvio que una validación rigurosa de los resultados facilita, no sólo una medida de la calidad del documento que se aporta, sino también un criterio para demostrar la idoneidad del método propuesto para una aplicación específica.

A partir de la realización del muestreo, puede construirse una tabla o matriz de confusión, en donde se resuman los acuerdos y desacuerdos entre clases del mapa y del terreno. Esta matriz puede analizarse estadísticamente, con objeto de obtener una serie de medidas sobre la fiabilidad del trabajo: global y para cada una de las categorías. Puesto que la medida de la fiabilidad se estima a partir de un muestreo, su valor real se mueve entre unos márgenes, tanto más próximos al valor medio cuanto mayor sea al tamaño de la muestra y menor el grado de error.

8.3. Diseño del muestreo para la verificación

El diseño y desarrollo del muestreo supone la columna vertebral del proceso de verificación. Al igual que en otras aplicaciones, el muestreo espacial sirve en este caso para seleccionar una pequeña parte del área de estudio, de tal forma que sea suficientemente representativa del conjunto. Esa semejanza con la población de referencia debe conseguirse, además, minimizando el tamaño de la muestra, con objeto de reducir los costes del proceso de verificación. En definitiva, la principal virtud de un buen muestreo es seleccionar adecuadamente una parte de la imagen clasificada, de tal forma que, siendo lo más pequeña posible, represente adecuadamente al conjunto. La calidad de la estimación depende de una serie de factores, que deben considerarse al planificar el muestreo (Congalton, 1991):

(i) método de selección de la muestra, (ii) tamaño y distribución, y (iii) nivel de confianza otorgado a la estimación.

8.3.1. Tipos de muestreo

Entre los tres parámetros arriba enunciados, la elección del método más idóneo de muestreo parece el más controvertido entre los especialistas. Los esquemas más regularmente empleados en el proceso de verificación son (Rosenfeld, 1982; Campbell, 1987; Congalton, 1988b y 1991; Stehman, 1992: Fig. 8.5):

(i) Aleatorio simple. Los elementos a verificar se eligen de tal forma que todos cuenten con la misma probabilidad de ser seleccionados, y que la elección de uno no influya en la del siguiente. Gracias a este carácter probabilístico, el muestreo aleatorio es el más sólido estadísticamente, si bien presenta problemas en su aplicación espacial, por cuanto puede suponer elevados costes de desplazamiento. Por otra parte, existe cierta probabilidad de no recoger adecuadamente la variación espacial presente en la imagen clasificada.

(ii) Aleatorio estratificado. La muestra se realiza dividiendo la población en regiones o estratos, de acuerdo a una variable auxiliar (altitud, por ejemplo). Es más complejo de diseñar que el anterior, pero aporta información sobre subconjuntos de la población, además de reducir el error de muestreo siempre que la variable auxiliar esté claramente relacionada con la distribución del error.

(iii) Sistemático. La muestra se distribuye a intervalos regulares, a partir de un punto de origen señalado aleatoriamente. Garantiza un muestreo completo de la superficie a verificar, pero puede facilitar estimaciones erróneas si existe algún tipo de patrón periódico en el área observada (geometría de las parcelas, por ejemplo). Por otro lado, no asegura una estimación probabilística, por cuanto no existe aleatoriedad en la selección de las observaciones.

(iv) Sistemático no alineado. Modifica el esquema anterior, gracias a variar aleatoriamente —en cada línea y columna del muestreo— una coordenada, manteniendo fija la otra. Esto permite introducir una cierta aleatoriedad en la elección de la muestra, mientras reduce el sesgo debido a la periodicidad. Por otra parte, sigue garantizando una revisión completa del territorio.

(v) Por conglomerados. Se selecciona como unidad de muestra un grupo de observaciones, denominado conglomerado (*cluster*), en lugar de individuos aislados. En otras palabras, en cada punto a verificar se toman varias muestras, en puntos vecinos al elegido aleatoriamente, y de acuerdo a un esquema prefijado. Por ejemplo, un conglomerado podría constituirse por cinco puntos, a cierta distancia del punto central y siguiendo una forma de L. Este método de muestreo reduce

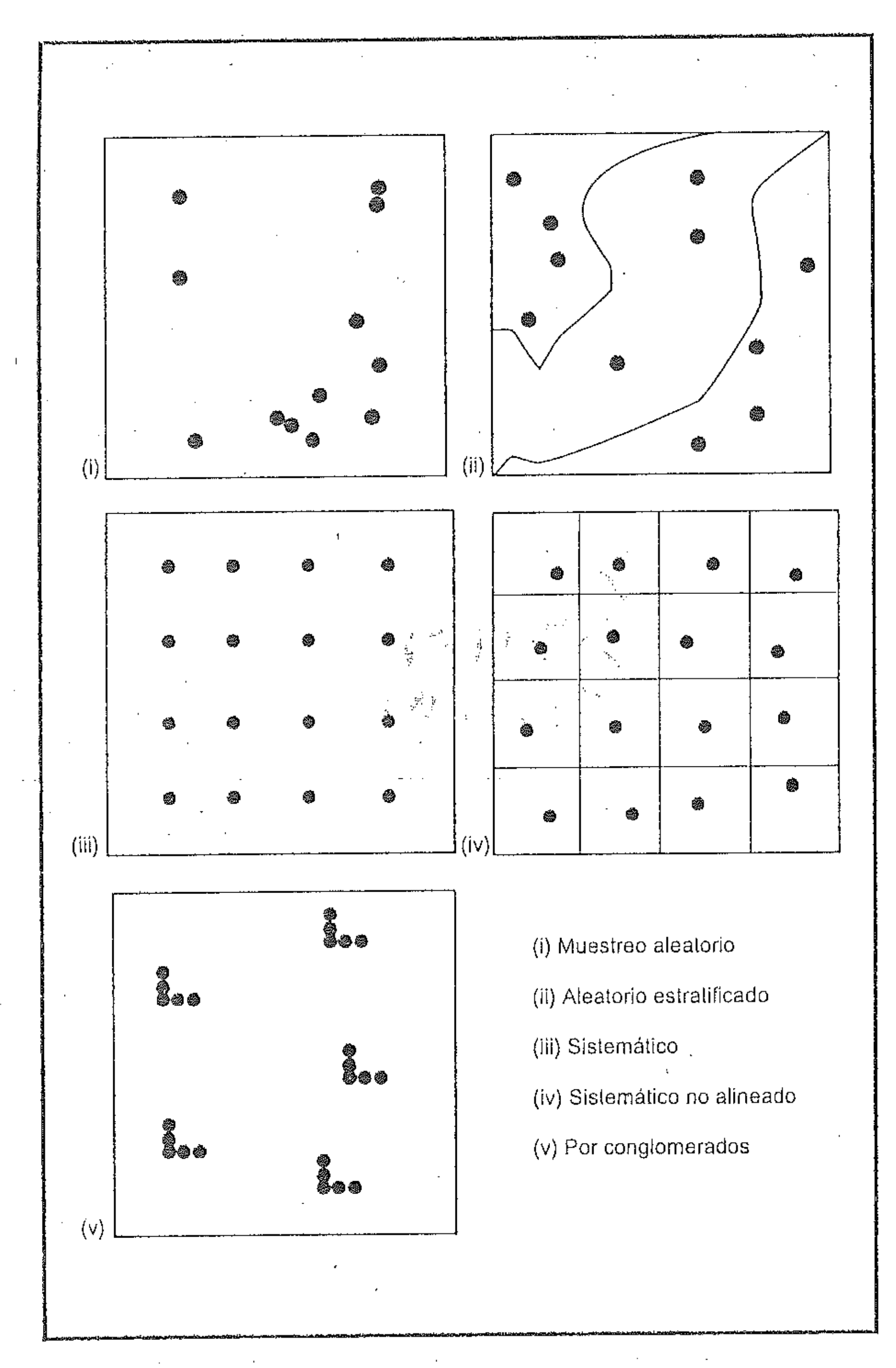


Fig. 8.5 - *Tipos de muestreo aplicados a la verificación*

los costes de transporte, pero resulta más complejo y, normalmente, menos preciso que los anteriores.

De entre ellos, el muestreo sistemático no alineado ha sido profusamente empleado en tareas de verificación de clasificaciones (Fitzpatrick-Lins, 1978; Rosenfeld, 1982; Dozier y Strahler, 1983; Chuvieco, 1986), gracias a las propiedades arriba enunciadas. Otros autores recomiendan métodos alternativos, como el aleatorio simple (Hord y Brooner, 1976), el estratificado por categorías (VanGenderen, 1978; Ginevan, 1978) o el muestreo por conglomerados (Todd et al., 1980). No obstante, parece conveniente comentar con más detalle el muestreo sistemático no alineado, en razón de su frecuente presencia en trabajos de verificación de clasificaciones.

En este método, la elección de la muestra parte, habitualmente, de dividir el área de estudio en una malla regular de rectángulos, que podrían hacerse coincidir con la cuadrícula UTM. Sobre cada uno de ellos, se elige uno o varios puntos de muestreo, de acuerdo a un proceso de selección sistemático, pero no alineado. Esto quiere decir, que, en cada una de las columnas y filas de esa matriz de rectángulos, las coordenadas de cada punto de observación se eligen manteniendo un eje constante, y variando el otro aleatoriamente (fig. 8.6). De esta forma, se introduce un cierto rasgo de aleatoriedad, a la vez que se mantiene una observación global del territorio (Berry y Baker, 1968).

Los trabajos experimentales de Congalton (1984 y 1988b) parecen aportar una visión más rigurosa para esta elección. Este autor partió de una serie de tres imágenes clasificadas, de ámbito agrícola, ganadero y forestal, para las que se contaba con una cartografía de referencia suficientemente detallada. Esto permitió superponer digitalmente las clasificaciones obtenidas con los mapas de la verdad-terreno, obteniendo una medida precisa del error total incluido en cada una de las tres imágenes. A partir de esta medida, aplicó los cinco esquemas de muestreo antes aludidos, para estudiar cuál de ellos la estimaba con mayor rigor. Con objeto de investigar la acción de diversos parámetros, se seleccionaron distintos tamaños de muestra y se aplicó el muestreo según varios escenarios. Las conclusiones de estos trabajos situaron al muestreo aleatorio simple como el esquema más eficaz, seguido del aleatorio estratificado. El muestreo por conglomerados ofreció también buenos resultados, siendo especialmente propio en el caso de verificar grandes superficies en donde los costes de desplazamiento pueden ser cruciales. En ese caso, Congalton recomendaba el empleo de pequeños conglomerados, entre 5 y 25 píxeles de tamaño según la variabilidad de la imagen. El autor desaconseja el empleo del muestreo sistemático y del sistemático no alineado, especialmente cuando la imagen tienda a presentar un error periódico, como es el caso de las zonas agrícolas o cubiertas por pastizales. Por ello, sugiere aplicar una evaluación previa de la auto-correlación espacial (Congalton, 1988a), que puede facilitar la decisión sobre qué tipo de muestreo resulta más conveniente (Congalton, 1991).

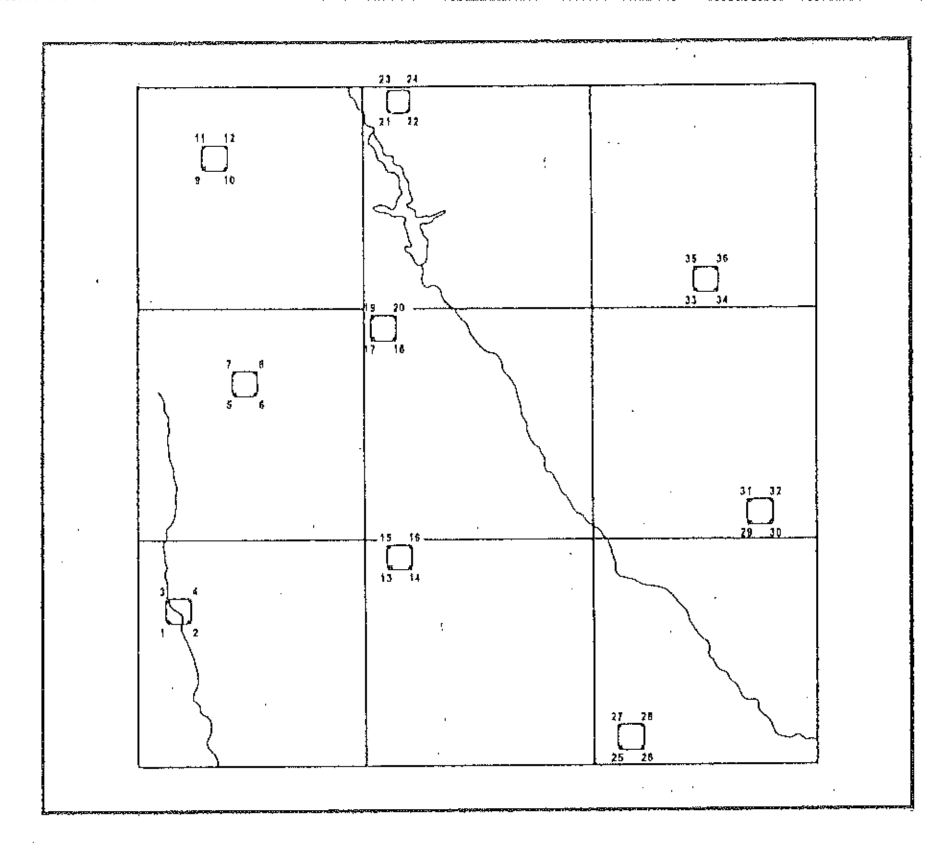


Fig. 8.6 - *Ejemplo de un muestreo sistemático no alineado*

Nada comenta Congalton sobre los costes de desplazamiento asociados a cada uno de estos esquemas de muestreo. Por otras referencias, y nuestra propia experiencia, podemos establecer una jerarquía desde el muestreo aleatorio simple hasta el muestreo por conglomerados, de mayor a menor coste. Asimismo, en la valoración de Congalton, no se considera la estimación de la fiabilidad por categorías. En caso de que la clasificación haya incluido cubiertas poco desarrolladas en la zona de estudio, el muestreo aleatorio puede obviarlas, al no implicar un examen sistemático de toda la superficie. Por esta razón, aun con ser de gran interés, los trabajos de Congalton no anulan completamente el empleo del muestreo sistemático no alineado en trabajos de verificación.

8.3.2. Tamaño de la muestra

En cuanto al tamaño de la muestra, Congalton (1988b) sugiere una superficie aproximada al 1 % de la superficie cartografiada. En éste, como en otros muestreos, el tamaño de la muestra depende del nivel de probabilidad, o de confianza, que quiera otorgarse a la estimación, así como de la propia variabilidad de la imagen considerada. Como se trata de medir una variable binomial (acierto-error), se emplea normalmente la fórmula:

$$n = \frac{z^2\,p\,q}{E^2} \qquad [8.1]$$

donde z es la abcisa de la curva normal para un nivel determinado de probabilidad; p indica el porcentaje de aciertos estimado; q, el de errores (q = 1 - p), y E, el nivel permitido de error. El valor de p y q puede estimarse a partir de datos auxiliares o simplemente igualarse a 50. Por ejemplo, si quiere conocerse el número necesario de puntos de verificación para estimar, con el 95 % de probabilidad, el error de un determinado mapa, suponiendo que los aciertos son del 85 %, y el máximo de error permitido es de ± 5 %, puede aplicarse:

$$n = \frac{1{,}96^2 \times 85 \times 15}{5^2} = 195{,}92$$

lo que indica que, al menos, se han de tomar 196 muestreas para obtener los niveles de precisión marcados en el muestreo. Este tamaño puede resultar muy pequeño si hacemos referencia al total de píxeles de la imagen. Hay que tener en cuenta que en esta aplicación no resulta muy apropiado seguir las reglas clásicas de la estadística, ya que el número de píxeles de referencia (el total del área clasificada) es muy grande. En consecuencia, algunos autores proponen un valor mínimo de muestras para obtener una estimación fiable del error. Este umbral se sitúa en 50 píxeles por cada clase temática (Hay, 1979; Congalton, 1991). Se aconseja, además, realizar el muestreo para todas las clases por separado, partiendo de la clase con menor extensión. Esta marcará la proporción del área a muestrear para el resto de las categorías.

Una vez diseñado el método y tamaño de la muestra, y localizados los puntos de verificación, el paso siguiente consiste en obtener, para cada uno de ellos, la clase real y la deducida de la clasificación. La primera puede obtenerse a partir de trabajos de campo o de documentos auxiliares de mayor detalle (fotografías áreas, mapas de cultivos o vegetación), mientras la segunda se adquiere a partir del fichero digital con la imagen clasificada, o del documento temático si se optó por el análisis visual. Lógicamente, conviene obtener la información sobre la verdad-terreno en la fecha más cercana posible a la de adquisición de la imagen, evitando desfases temporales que harían inexacta cualquier comparación. De igual forma, resulta necesario localizar certeramente los puntos de verificación, con objeto de eludir desavenencias más debidas a errores de posición que de asignación.

Como ejemplo de trabajo de verificación, se presenta el desarrollado para un proyecto de cartografía de modelos de combustibles forestales (Salas y

Chuvieco, 1995). Este mapa se realizó a partir de la clasificación digital de una imagen Landsat-TM, adquirida en julio de 1988. En el área de estudio, de unos 500 km², se tomaron 144 parcelas que se visitaron en el terreno para observar la cubierta vegetal del suelo. El total de píxeles verificados es de 9.515 recogiendo el mínimo de 50 píxeles por categoría señalado previamente.

8.4. La matriz de confusión

Consecuencia de la fase de muestreo será un listado de puntos test, para los que poseemos tanto su cobertura real como la deducida por la clasificación. Con estos datos puede formarse una matriz, denominada de confusión puesto que recoge los conflictos que se presentan entre categorías. En nuestro caso, se generaron cuatro tablas, de acuerdo a los diversos esquemas de clasificación abordados en ese trabajo (tablas 8.1 a 8.4). En la matriz de confusión las filas se ocupan por las clases de referencia, y las columnas por las categorías deducidas de la clasificación. Lógicamente ambas tendrán el mismo número y significado; se trata, en suma, de una matriz cuadrada: n x n, donde n indica el número de categorías.

	1	2	4	5	6	7	9	A	B	Total	Ex.P.	E.O.
1	551	71	57	7	207			255		1.148	48,0	52,0
2	4	543	75	3	31		116	61		833	65,2	34,8
4		190	209	2	57		751	31		1.240	16,9	83,1
5	17		3	525			46	1		592	88,7	11,3
6	12	193	67	49	273		107	31		732	37,3	62,7
7	48	24	55	2	3		393	57		582	0,0	100,0
9	23	75	145	19	5		2.507	84		2.858	87,7	12,3
A	128	75	17	9			9	1.145		1.383	82,8	17,2
B									147	147	100,0	0,0
Tot.	783	1.171	628	616	576		3.929	1.665	147	9.515		
Ex.U.	70,4	46,4	33,3	85,2	47,4	0	63,8	68,7	100			
E.C.	29,6	53,6	66,7	14,8	52,6	100	37,2	31,3	0			

Los números 1 a 9 hacen referencia a los modelos combustibles definidos por el ICONA: 1 pastizal; 2 pastizal arbolado; 4 matorral denso y alto; 5 matorral ralo; 6 matorral de altura intermedia; 7 matorral bajo arbolado; 9 cubiertas forestales con sotobosque limpio. La clase A identifica las zonas agrícola-ganaderas y urbanas, y B las láminas de agua. Ex.P y Ex.U. son las exactitudes del productor y usuario, respectivamente, y E.O y E.C. son los errores de omisión y comisión

Tabla 8.1 - *Matriz de confusión obtenida para una clasificación no supervisada de una imagen TM e información auxiliar (columnas, clases del mapa; filas, verdad terreno)*

	1	2	4	5	6	7	9	A	B	Total	Ex.P.	E.O.
1	729	34	46				88	251		1.148	63,5	36,5
2	125	502	96	1	25		74	10		833	60,3	39,7
4	62	151	374	1	15		636	1		1.240	30,2	69,8
5	121	83	49	135	43		79	82		592	22,8	77,2
6	238	227	110		94		48	15		732	12,8	87,2
7	7	19	108	9	5		369	65		582	0,0	100,0
9	3	42	118	2	6		2.613	74		2.858	91,4	8,6
A	201	25		4	4		42	1.107		1.383	80,0	20,0
B									147	147	100,0	0,0
Tot.	1.486	1.083	901	152	192		3.949	1.605	147	9.515		
Ex.U.	49,1	46,4	41,5	88,8	49,0	0	66,2	69,0	100			
E.C.	50,9	53,6	58,5	11,2	51,0	100	33,8	31	0			

Tabla 8.2 - *Matriz de confusión para la clasificación no supervisada sólo con las bandas Landsat-TM (igual significado que la tabla 8.1)*

	1	2	4	5	6	7	9	A	B	Total	Ex.P.	E.O.
1	884	5	45	62			60	92		1.148	77,0	23,9
2	40	362	176	57	41		147	10		833	43,4	56,6
4	18	60	819	12	3		323	5		1.240	66,0	34,0
5	12		26	486	24		43	1		592	82,1	17,9
6	111	56	299	47	133		78	8		732	18,2	71,0
7	13	4	125	21	16		375	28		582	0,0	100,0
9	5	3	295	14	4		2.531	6		2.858	88,6	11,4
A	331	174	2	26			267	583		1.383	42,2	57,8
B									147	147	100,0	0,0
Tot.	1.414	664	1.787	725	221		3.824	733	147	9.515		
Ex. U.	62,5	54,5	45,8	67,0	60,2	0	66,2	79,5	100			
E. C.	37,5	45,5	54,2	33,0	39,8	100	33,8	20,5	0			

Tabla 8.3 - *Matriz de confusión para la clasificación supervisada sólo con las bandas Landsat-TM (igual significado que la tabla 8.1)*

La diagonal de esta matriz expresa el número de puntos de verificación en donde se produce acuerdo entre las dos fuentes (mapa y realidad), mientras los marginales suponen errores de asignación. La relación entre el número de puntos correctamente asignados y el total expresa la fiabilidad global del mapa. Los residuales en filas indican tipos de cubierta real que no se incluyeron en el mapa,

	1	2	4	5	6	7	9	A	B	Total	Ex.P.	E.O.
1	927	35	6		11		99	70		1.148	80,7	19,3
2	49	575	7		192	2	5	3		833	69,0	31,0
4	63	74	812		77	11	181	22		1.240	65,5	34,5
5				590				2		592	99,7	0,3
6	42	70	39	19	489		59	14		732	66,8	33,2
7		6	104		1	93	329	49		582	16,0	84,0
9	5	34	145	1	6	51	2.273	343		2.858	79,5	20,6
A	87	58						1.238		1.383	89,5	10,5
B									147	147	100,0	0,0
ToC	1.173	852	1.113	610	776	157	2.946	1.741	147	9.515		
Ex.U.	79,0	67,5	73,0	96,7	63,0	59,2	77,2	71,1	100			
E.C.	21,0	32,5	27,0	3,3	37,0	40,8	22,8	28,9	0			

Tabla 8.4 - *Matriz de confusión para la clasificación mixta con las bandas Landsat-TM e información auxiliar (igual significado que la tabla 8.1)*

mientras los residuales en columnas implican cubiertas del mapa que no se ajustan a la realidad. En definitiva, representan los errores de omisión y de comisión, respectivamente (Aronoff, 1982; Owe y Ormsby, 1984).

El interés de estas tablas de confusión proviene de su capacidad para plasmar los conflictos entre categorías. De esta forma, no sólo conocemos la fiabilidad global de la clasificación, sino también la exactitud conseguida para cada una de las clases, así como los principales conflictos entre ellas.

En el caso de las matrices presentadas, pueden observarse las principales confusiones presentes en los distintos ensayos de clasificación. Como se trata de discriminar entre cubiertas vegetales en función de su comportamiento frente al fuego de superficie, resulta muy complicado separar algunas clases, ya que en ciertas zonas la vegetación presente en el suelo puede enmascararse por un dosel vegetal continuo, además de ser muy complejo distinguir en categorías mixtas (pastizal o matorral arbolado). Las principales confusiones que se observan en las tablas 8.1 a 8.4 son el solapamiento entre los distintos tipos de matorral (modelos 4,5 y 6, sólo separables por la altura, lo que resulta complejo de diferenciar sobre imágenes Landsat), la difícil discriminación del matorral arbolado (modelo 7, sólo presente en la clasificación de la tabla 8.4), la confusión entre matorral y pastizales y la mezcla entre arbolado y matorral alto-denso.

Si se realizó correctamente la fase de entrenamiento, la mayor parte de estas confusiones ya habrían sido detectadas, pero aquí se ofrece una medición

mucho más explícita de estos problemas. A partir de estos datos, puede orientarse la búsqueda de nuevos métodos de clasificación, el empleo de imágenes de otras fechas, o el de bandas auxiliares (modelo digital de elevaciones o suelos), con objeto de facilitar un documento suficientemente certero. Asimismo, puede optarse por una leyenda simplificada, que reduzca las confusiones entre categorías de transición.

8.5. Análisis estadístico de la matriz de confusión

8.5.1. Medidas globales de fiabilidad

A partir de la matriz de confusión pueden desarrollarse toda una serie de medidas estadísticas que concluyan el proceso de validación. La más simple consiste en calcular la fiabilidad global del mapa, relacionando los elementos de la diagonal con el total de puntos muestreados:

$$\hat{F} = \frac{\sum_{i=1,n} X_{ii}}{\sum_{i=1,n} \sum_{j=1,n} X_{ij}} \qquad [8.2]$$

En el caso que nos ocupa, la fiabilidad estimada varía entre el 62 y el 75 % según las clasificaciones. Gracias a la teoría del muestreo pueden calcularse los umbrales inferior y superior en los que se encontraría la fiabilidad real alcanzada por la clasificación, a partir de conocer el valor estimado. Ese intervalo se calcula, para un determinado nivel de significación (α), a partir del error del muestreo (ES) y del nivel de probabilidad ($1 - \alpha$):

$$F = \hat{F} \pm z \; ES \qquad [8.3]$$

donde z indica la abcisa del área bajo la curva normal para ese nivel de probabilidad ($1 - \alpha$); ES es el error estándar del muestreo, en función del porcentaje de aciertos (p), de fallos (q) y del tamaño de la muestra (n):

$$ES = \sqrt{\frac{pq}{n}} \qquad [8.4]$$

Por ejemplo, para la matriz de la tabla 8.1, el número de píxeles bien asignados fue 5.900, frente a los 9.515 totales. Esto significa una fiabilidad estimada del 62 %. Con un nivel de significación de 0,05 (probabilidad del 95 %), el error del muestreo sería:

$$ES = \sqrt{\frac{62x38}{9515}} = 0{,}005$$

y, por tanto, el intervalo de confianza puede calcularse como:

$$F = 62 \pm 1{,}96 \times 0{,}005 = 62 \pm 0{,}0099$$

En definitiva, puede asegurarse, con un 95 % de probabilidad, que la fiabilidad real se encuentra entre 61,99 y 62,01 %.

8.5.2. Fiabilidad del usuario y del productor

Ahora bien, conviene tener en cuenta que este valor puede ocultar importantes diferencias entre categorías. Por ello, un análisis más riguroso debe también considerar las celdillas marginales de la matriz. En el caso de las filas, los marginales indican el número de píxeles que, perteneciendo a una determinada categoría, no fueron incluidos en ella. Éstos se denominan errores de omisión (E_o). Para cada clase se calculan como:

$$E_{o,i} = \frac{X_{i+} - X_{ii}}{X_{i+}} \qquad [8.5]$$

donde X_{i+} indica el marginal de la fila i, y X_{ii} la diagonal de dicha fila.

De igual forma, las celdillas no diagonales de las columnas expresan los errores de comisión; esto es, píxeles que se incluyeron en una determinada categoría perteneciendo realmente a otra:

$$E_{c,i} = \frac{X_{+i} - X_{ii}}{X_{+i}} \qquad [8.6]$$

donde X_{+i} indica el marginal de la columna i, y X_{ii} la diagonal de dicha columna.

Los errores de omisión y comisión expresan dos enfoques del mismo problema. Los primeros se refieren a una definición imperfecta de la categoría. Los segundos, a una delimitación excesivamente amplia. Desde otro punto de vista, algunos autores hablan de exactitud del usuario y del productor (Aronoff, 1982; Story y Congalton, 1986). La primera está en relación inversa con los errores de comisión, mientras la segunda lo está con los de omisión:

$$F_{u,i} = \frac{X_{ii}}{X_{+i}} \qquad [8.7]$$

$$F_{p,i} = \frac{X_{ii}}{X_{i+}} \qquad [8.8]$$

para cada una de las i categorías. El interés de esta distinción puede mostrarse con un sencillo ejemplo. Si para una especie forestal el error de omisión es bajo, existe una alta probabilidad de que la superficie realmente ocupada por esa especie esté incluida en el mapa, lo que significa un logro para el productor del mismo. Sin embargo, puede a la vez haberse producido un alto error de comisión, lo que implica que la probabilidad de que una zona clasificada en el mapa como tal especie lo sea realmente es muy baja. Esto supone un grave riesgo para el usuario de esa información (Story y Congalton, 1986).

En el caso de la matriz de confusión recogida en 8.1, el modelo 9 (arbolado denso) ofrece una fiabilidad del productor del 87,7 %; esto es, aproximadamente nueve de cada diez superficies con esa cubierta fueron discriminadas adecuadamente en la clasificación. Sin embargo, la fiabilidad del usuario supera ligeramente el 60 %, lo que quiere decir que sólo tres quintas partes de las zonas clasificadas como tal cubierta realmente lo son. En otras palabras, el error de omisión es bajo (pocas zonas de esta cubierta dejaron de identificarse como tal), pero el error de comisión es medio-alto (bastantes zonas cartografiadas como esta cubierta no lo son en realidad). Ambas ópticas son complementarias y de gran trascendencia. La primera desde el punto de vista del productor del mapa, la segunda de la persona que lo utiliza.

8.5.3. Aplicación del análisis categórico multivariante

Hasta ahora hemos estudiado lo que ocurre en la diagonal y en los residuales de filas y columnas. También resulta de gran interés analizar las relaciones múltiples entre las distintas categorías. Con este objetivo, se han introducido en los últimos años las técnicas de análisis categórico multivariante, idóneas para el estudio global de matrices de confusión (Congalton et al., 1983; Congalton y Mead, 1983; Campbell, 1987).

Uno de los índices más empleados, en este sentido, es el estadístico Kappa (κ), que mide la diferencia entre el acuerdo mapa-realidad observado y el que cabría esperar simplemente por azar. En definitiva, intenta delimitar el grado de ajuste debido sólo a la exactitud de la clasificación, prescindiendo del causado por factores aleatorios. La estimación de κ se obtiene a partir de la siguiente fórmula (Hudson y Ramm, 1987):

$$\kappa = \frac{N \Sigma_{i=1,n} X_{ii} - \Sigma_{i=i,n} X_{i+} X_{+i}}{N^2 - \Sigma_{i=i,n} X_{i+} X_{+i}} \qquad [8.9]$$

en donde X_{ii} indica el acuerdo observado, y el producto de los marginales (X_{i+}, X_{+i}) el acuerdo esperado en cada categoría i. El acuerdo observado aparece en la diagonal

de la matriz, mientras el esperado nos sirve para calcular el ajuste entre mapa y realidad que puede deberse al azar. La estimación de κ nos sirve para conocer el grado de significación de este estadístico, y, por tanto, si el acuerdo observado se aleja o no significativamente del acuerdo esperado al azar. En definitiva, el test pretende evaluar si la clasificación ha discriminado las categorías de interés con precisión significativamente mayor a la que se hubiera obtenido con una asignación aleatoria.

En el caso de la matrices de confusión que venimos analizando, el valor estimado de κ varía entre 0,53 y 0,70, lo que indica que las clasificaciones son entre un 53 y un 70 % mejores que las esperables al azar. Un valor de κ igual a 1 indica un acuerdo pleno entre la realidad y el mapa, mientras un valor cercano a 0 sugiere que el acuerdo observado es puramente debido al azar. Por su parte un valor negativo, supone también una clasificación pobre, si bien su sentido depende de otros factores externos, como el propio tamaño de la muestra.

Una de las aplicaciones más claras del índice κ es comparar clasificaciones realizadas por distintos métodos, con objeto de estudiar si difieren significativamente en cuanto a su grado de ajuste con la realidad. Para ello, puede calcularse el error del muestreo asociado a κ ($\sigma^2(\kappa)$) aplicando luego la distribución normal para estimar intervalos de confianza (Skidmore, 1989):

$$z = \frac{\kappa_1 - \kappa_2}{\sqrt{\sigma^2_{\kappa 1} + \sigma^2_{\kappa 2}}} \qquad [8.10]$$

Este test puede emplearse para contrastar la validez efectiva de distintos métodos de clasificación (Congalton et al., 1983; Chuvieco y Congalton, 1988a). Por ejemplo, en el caso de los dos mejores ensayos de clasificación (tabla 8.3 y 8.4), los valores estimados de kappa son, respectivamente, 0,538 y 0,70. Los valores de varianza calculados son 0,000034 y 0,0000282, luego el valor z resultante (20,40) excede el que cabría esperar aleatoriamente con más del 95 % de probabilidad. Puede concluirse, por tanto, que ambas clasificaciones son significativamente distintas, o, dicho de otra forma, que la segunda es significativamente mejor que la primera. Esta misma conclusión se obtiene al comparar la clasificación de la tabla 8.4 con las demás, no siendo significativamente distintas, por el contrario, las incluidas en las tablas 8.1 y 8.3.

En el caso de que se pretenda comparar dos matrices de confusión —ya sea generadas a partir de distintos métodos de asignación, ya de distintas imágenes o de distintos individuos— κ puede indicarnos cual de ellos es más efectivo en su conjunto. Ahora bien, en el caso de que se intente comparar la fiabilidad de dos mapas con distinto tamaño de muestreo, el estadístico κ no nos ofrece una valoración adecuada. Con vistas a solucionar este problema, Congalton (1984)

propuso aplicar un procedimiento multivariado para normalizar una matriz cuadrada (Bishop et al., 1975). Se trata de un método iterativo que ajusta los totales de filas y columnas a un valor común (+1), mediante sucesivos incrementos o reducciones en las celdillas de la matriz. El proceso se detiene cuando los marginales de cada fila y columna sumen + 1,00, o un valor muy próximo a éste. En las tablas 8.5 a 8.8 se presentan las matrices normalizadas que venimos analizando, gracias a un programa cedido por el Prof. Congalton.

Este proceso ofrece una nueva medida de la fiabilidad global. Basta calcular el valor medio de los elementos de la diagonal, que siguen indicando el acuerdo entre filas y columnas. Obviamente la situación ideal sería que todos los elementos diagonales de la matriz fueran igual a 1. Esto indicaría un acuerdo perfecto entre realidad y mapa, mientras una pobre clasificación se mostraría en valores diagonales muy bajos.

0,528	0,030	0,044	0,007	0,231	0,058	0,000	0,099	0,003
0,010	0,527	0,137	0,008	0,082	0,137	0,034	0,056	0,008
0,001	0,166	0,340	0,005	0,135	0,123	0,199	0,026	0,007
0,029	0,000	0,005	0,847	0,001	0,101	0,010	0,001	0,006
0,021	0,137	0,089	0,080	0,523	0,100	0,023	0,021	0,006
0,194	0,042	0,179	0,010	0,016	0,244	0,207	0,093	0,014
0,038	0,052	0,187	0,030	0,010	0,097	0,525	0,055	0,006
0,180	0,046	0,020	0,013	0,001	0,085	0,002	0,649	0,005
0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,054	0,000	0,000	0,944

Tabla 8.5 - *Matriz normalizada para la clasificación no supervisada de una imagen TM e información auxiliar*

0,559	0,038	0,054	0,006	0,004	0,129	0,024	0,180	0,008
0,086	0,492	0,099	0,016	0,160	0,115	0,018	0,007	0,007
0,044	0,154	0,400	0,017	0,101	0,119	0,157	0,001	0,007
0,039	0,038	0,024	0,684	0,126	0,053	0,009	0,024	0,003
0,132	0,179	0,092	0,004	0,477	0,093	0,009	0,008	0,006
0,010	0,036	0,212	0,197	0,066	0,219	0,167	0,080	0,013
0,002	0,041	0,119	0,027	0,040	0,112	0,607	0,046	0,007
0,128	0,023	0,001	0,046	0,026	0,107	0,009	0,655	0,006
0,000	0,000	0,000	0,003	0,001	0,053	0,000	0,000	0,943

Tabla 8.6 - *Matriz normalizada para la clasificación no supervisada sólo con las bandas Landsat-TM*

0,654	0,008	0,016	0,061	0,002	0,082	0,010	0,163	0,005
0,032	0,560	0,064	0,059	0,149	0,086	0,026	0,020	0,005
0,025	0,159	0,505	0,022	0,021	0,147	0,095	0,018	0,009
0,014	0,001	0,014	0,705	0,123	0,121	0,011	0,004	0,007
0,094	0,094	0,117	0,053	0,513	0,093	0,015	0,017	0,006
0,030	0,020	0,129	0,063	0,167	0,244	0,184	0,151	0,014
0,006	0,008	0,156	0,022	0,023	0,125	0,635	0,018	0,007
0,145	0,151	0,001	0,015	0,001	0,048	0,026	0,610	0,003
0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,054	0,000	0,001	0,944

Tabla 8.7 - *Matriz normalizada para la clasificación supervisada sólo con las bandas Landsat-TM*

0,804	0,046	0,010	0,000	0,015	0,005	0,074	0,045	0,002
0,040	0,692	0,011	0,000	0,225	0,024	0,004	0,002	0,002
0,031	0,054	0,708	0,000	0,055	0,066	0,076	0,008	0,001
0,001	0,001	0,002	0,978	0,001	0,010	0,001	0,003	0,004
0,042	0,103	0,069	0,019	0,698	0,006	0,050	0,010	0,002
0,000	0,006	0,115	0,000	0,001	0,680	0,174	0,022	0,001
0,002	0,016	0,083	0,001	0,003	0,194	0,621	0,080	0,001
0,080	0,080	0,001	0,001	0,001	0,005	0,000	0,830	0,002
0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,009	0,001	0,001	0,986

Tabla 8.8 - *Matriz normalizada para la clasificación mixta*

En este caso, el valor medio de las diagonales ofrece un porcentaje medio de fiabilidad entre el 57 y el 78 %. Por categorías, se matizan más los valores aportados por las tablas originales, especialmente en lo que se refiere a acuerdos estimados perfectos, como es el caso de las áreas agrícolas que pasan del 100 % de exactitud a valores cercanos a 0,94.

Conviene tener en cuenta que estas medidas representan una estimación baja de la fiabilidad real, debido a las propias características del proceso de normalización. Es preciso considerar que la matriz de confusión es un caso muy peculiar de una tabla de contingencia, por cuanto aparecen con frecuencia celdillas con valores muy bajos o iguales a cero, ya que hay confusiones entre categorías muy poco probables. Como quiera que el proceso de normalización añade una pequeña cantidad a cada celdilla para evitar los ceros, las celdillas que expresan aciertos se ven infravaloradas frente al resto. Este es el caso del modelo combustible 5, con una fiabilidad del 99,7 % en la tabla original (ensayo de clasificación

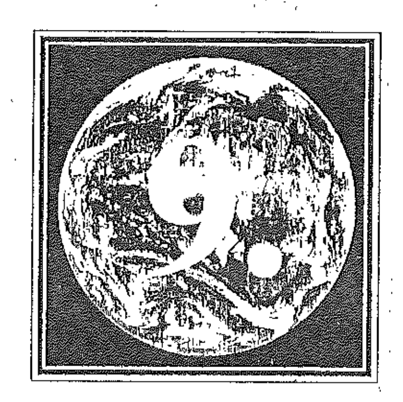
mixta), que desciende a 97 % en la normalizada, como consecuencia del reducido tamaño de la muestra.

Pese a este problema, el proceso de normalización ofrece una visión complementaria a la recogida en la matriz original. Su medida de la fiabilidad global y para cada una de las categorías, puede considerarse, con las reservas apuntadas, como una interesante alternativa a los métodos tradicionales, permitiendo comparar matrices con distinto número de muestras.

En la tabla 8.9 se recoge un resumen de los valores de fiabilidad, según los criterios expuestos en este capítulo, para las distintas matrices analizadas.

Clasificación	Fiabilidad global	Índice κ	Fiabilidad Normalizada
No supervisada (TM + información auxiliar)	62	53	57
No supervisada (TM)	60	50	56
Supervisada	62	54	60
Mixta	75	70	78

Tabla 8.9 - *Comparación de los índices de verificación de las clasificaciones (valores porcentuales)*



Teledetección y Sistemas de Información Geográfica

«La comunicación de masas anula la diversidad. Uniformiza todos los rincones de la Tierra. Las diferencias regionales se desvanecen. En un mundo dominado por los medios de comunicación, hay menos de todo salvo listas de los 10 mejores libros, discos, películas o ideas.»

[Michael Crichton, *El Mundo Perdido*]

9.1. Necesidad de los SIG

Buena parte de los usuarios de la teledetección espacial tienen por objetivo obtener un mapa temático que refleje adecuadamente el estado de la variable de interés (p.ej. tipo de suelo o de vegetación) en el área de estudio. En muchos casos, la obtención de ese mapa constituye la fase final del trabajo, su resultado último. En otros, se trata de un documento más que proporciona —junto a otras variables territoriales— un conocimiento integrado del territorio. En ese caso, la cartografía obtenida a partir de la teledetección constituye una de las variables que se incorporan a un sistema de información sobre el territorio, que incluye otras variables necesarias para realizar una evaluación más certera del paisaje, necesaria para su mejor aprovechamiento o conservación (fig. 9.1).

Este tipo de enfoques se han visto notablemente favorecidos por las nuevas tecnologías de almacenamiento, manipulación y salida gráfica de la información espacial. Los denominados Sistemas de Información Geográfica (SIG, o, en la terminología anglosajona *Geographic Information Systems, GIS*), pueden definirse como programas que almacenan, gestionan, manipulan y representan gráficamente datos con un algún tipo de componente espacial. Esto significa que la información que albergan está referenciada geográficamente, ya se trate de mapas, estadísticas o datos climáticos sobre un territorio concreto, por lo que todas estas variables pueden relacionarse mutuamente de formas muy diversas. Por cuanto la información que contienen se almacena en formato digital, los SIG aprovechan las posibilidades analíticas de los ordenadores, facilitando múltiples operaciones que resultan difícilmente accesibles por medios convencionales: generalización cartográfica, integración de variables espaciales, modelado del relieve, análisis de vecindad, etc. Además, los SIG permiten almacenar esa información espacial de forma eficiente, facilitando su actualización y acceso directo al usuario. En definitiva, amplían enormemente las posibilidades de análisis que brindan los mapas convencionales, además de facilitar su almacenamiento y visualización.

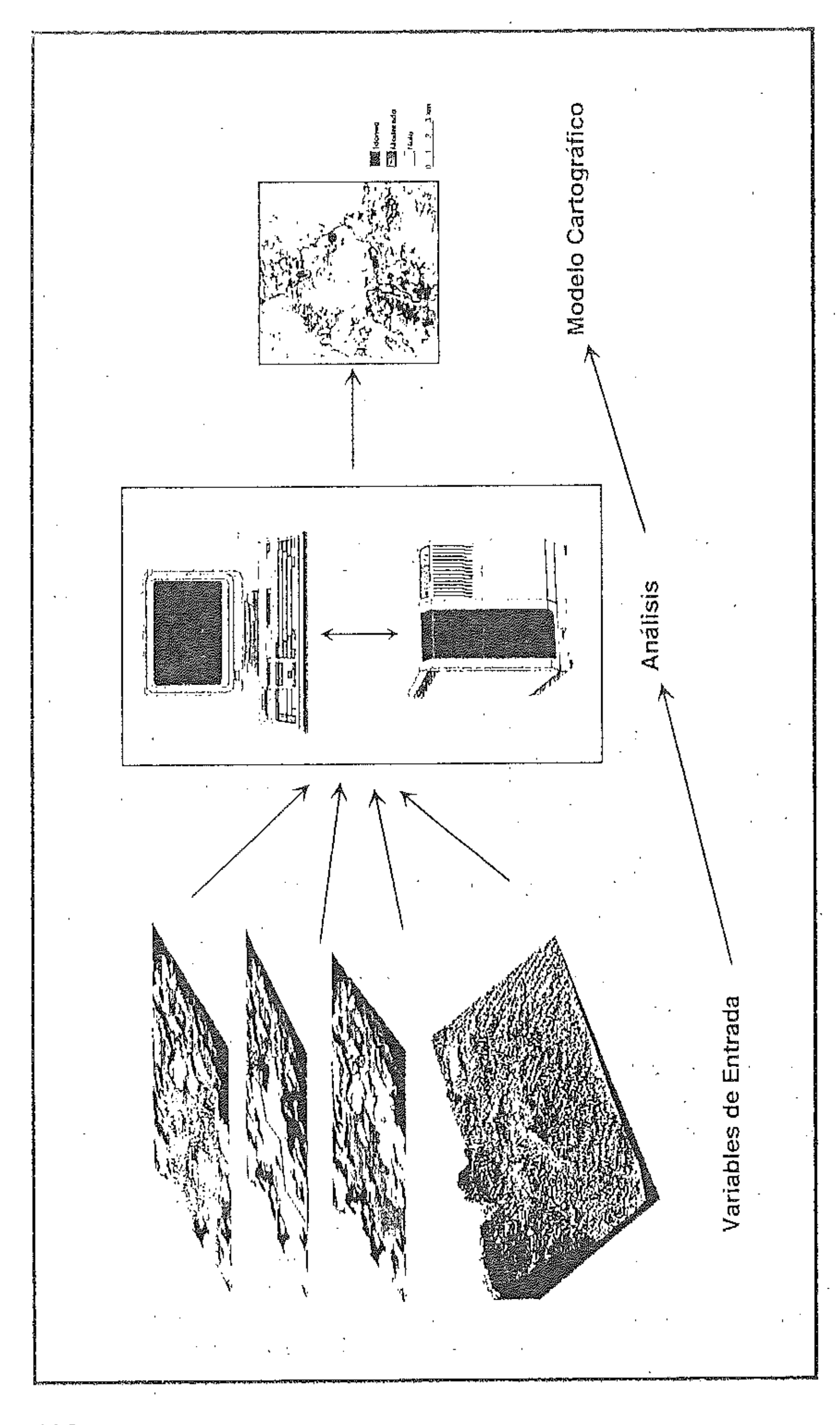


Fig. 9.1 - El enfoque integrado de los Sistemas de Información Geográfica

Un SIG está compuesto por unos equipos físicos, especializados en el manejo de información espacial, y una serie de programas que, conectados con aquéllos, permiten realizar múltiples transformaciones a partir de las variables espaciales introducidas al sistema. El SIG no es un producto cerrado en sí, sino un compuesto de elementos diversos: ordenador, digitizador, trazador gráfico, impresoras, y distintos paquetes de programas, orientado hacia una finalidad específica. También existen SIG comerciales, que intentan recoger todos estos productos bajo una misma estructura, si bien lo más habitual —en el momento presente— sea la comercialización exclusiva de los programas, que pueden adaptarse a soportes físicos muy variados.

La reciente disponibilidad de una amplia gama de manuales sobre SIG (Burrough, 1986; Aronoff, 1989; Tomlin, 1990; Star y Estes, 1990; Bosque, 1992; Comas y Ruiz, 1993; Maguire et al., 1991; Gutierrez y Gould, 1994) nos ha aconsejado prescindir, en esta edición, de la breve descripción sobre los componentes de un SIG que se incluía en la primera versión de esta obra. Por el contrario, nos centramos con mayor atención sobre las relaciones entre los SIG y la teledetección, así como sobre las modalidades concretas en las que ambas pueden integrarse.

9.2. Paralelismo y convergencia

Podemos afirmar que el origen de la teledetección y los SIG es paralelo. En otras palabras, ambas técnicas surgen como disciplinas independientes, sólo unidas por su orientación medio-ambiental. El primer SIG, diseñado en Canadá en los años 60, pretendía facilitar la labor de conservación de los ingentes recursos de que dispone ese país. Sin embargo, se dirigía más hacia el análisis que hacia la recogida de información espacial, que se suponía disponible por otras fuentes convencionales. Esta dimensión cartográfica de los SIG se refuerza en los años setenta, especialmente a través del trabajo del *Laboratory for Computer Graphics* de la Universidad de Harvard, que pretendía resolver los problemas de geometría computacional implicados en el proceso de esta información cartográfica (Coppock y Rhind, 1991).

Por otro lado, la teledetección durante los años sesenta se convierte en una fuente más de información medio-ambiental, considerada en sí misma y no en su conexión con otras variables espaciales. Se pretendía facilitar una cartografía e inventario de algún fenómeno de interés, culminando el trabajo con la obtención de dichos productos.

Ahora bien, el propio desarrollo de las técnicas de interpretación, especialmente a partir de 1972 cuando se comienzan a difundir las primeras imágenes Landsat, permite ampliar ese planteamiento. En un primer momento, esta

integración se contempla como apoyo a la clasificación digital (Strahler y Logan, 1978), por lo que se acude a variables temáticas que complementen la dimensión espectral incluida en las imágenes. Un paso más allá vino dado, a inicios de los años 80, por considerar la teledetección como auxiliar de un SIG, sirviendo como una fuente más de información para un estudio integrado sobre el territorio. Algunas áreas de aplicación donde este planteamiento fue más evidente son el manejo de recursos forestales (Martin, 1985), agrarios (Wheeler y Ridd, 1985), y los sistemas de prevención de incendios forestales (Yool et al., 1985). La situación reciente constituye a los SIG como elementos protagonistas, al integrar la información geográfica, sea cual sea la procedencia. En este sentido, la teledetección podría considerarse únicamente como una fuente de información para un SIG, junto a otras más convencionales (cartografía analógica, datos censales, sistemas automáticos de captura de datos, etc.) o recientes (Sistemas de Posicionamiento Global, GPS; teledetección, sensores terrestres de adquisición de datos, etc.). Al ser necesario superar algunos escollos en la manipulación de datos tan diversos, que no se contemplaron inicialmente en el diseño de los SIG (volumen de almacenamiento, estructuras de datos, herramientas de análisis), algunos autores son partidarios de acuñar un nuevo término: Sistemas Integrados de Información Geográfica (*Integrated Geographic Information System, IGIS*: Davis and Simonett, 1991), para designar a estos nuevos SIG.

La creciente convergencia entre la teledetección y los SIG se justifica, entre otras, por las siguientes razones:

(i) ambas poseen una clara orientación territorial,
(ii) cuentan con similares requerimientos, tanto en *hardware* como en *software*,
(iii) se desarrollan por y para el mismo tipo de profesionales,
(iv) respondan a demandas de investigación similares, como es el caso del análisis de errores, la estructura y acceso a los datos, el desarrollo del entorno informático y la metodología de interpretación (Star et al., 1991).

La integración tampoco está exenta de problemas, ligados a la disponibilidad de datos (costes, nivel de resolución espacial, espectral y temporal), a la educación y al acceso a los equipos, entre otros (Lauer et al., 1991). No obstante, el desarrollo previsible apunta a una clara convergencia entre ambas técnicas.

9.3. Requisitos técnicos comunes

Tanto los SIG como la teledetección (si se aborda una interpretación digital de los datos) requieren unos equipos físicos especializados en el manejo de información espacial, así como una serie de programas que, conectados con aquellos, permitan realizar múltiples transformaciones de datos. De los equipos descritos para el tratamiento digital de imágenes (6.3), la mayor parte pueden también emplearse para programas SIG. Aquí la distinción principal atañe, no tanto a la teledetección y los SIG, sino más bien a los SIG basados sobre formatos raster frente a los basados en formatos vectoriales. Los primeros tienen una gran afinidad con el tratamiento digital de imágenes, ya que la estructura de datos es muy similar. Por el contrario, los SIG vectoriales requieren unas unidades de salida peculiares, aunque sea cada vez más común utilizar periféricos raster para imprimir archivos vectoriales.

En la tabla 9.1. se incluye un resumen de los componentes físicos más comunes en tratamiento digital de imágenes, SIG raster y SIG vectoriales. Como puede observarse, las afinidades son claras en cuanto al tipo de ordenador, recomendándose que sea suficientemente potente como para procesar la gran cantidad de información que ambas técnicas manejan. De igual forma, se precisa una amplia capacidad de almacenamiento, para albergar una gran cantidad de datos, ya sean imágenes de satélite o mapas, con especial énfasis en el primer caso (Ferns y Press, 1988). En cuanto a los periféricos, las unidades de entrada de información son bastante comunes a los SIG vectoriales y raster (tableta digitizadora y escáner), mientras la teledetección suele trabajar con imágenes ya adquiridas digitalmente. Para manejar los programas, ambas técnicas emplean los mismos componentes (teclado, ratón o adaptador de juegos). Finalmente, en cuanto a los periféricos de salida gráfica, los SIG raster y la teledetección comparten los mismos equipos (impresoras de inyección de tinta, electrostáticas y filmadoras), mientras los SIG vectoriales han trabajado hasta hace muy poco con trazadores gráficos (*plotter* de plumillas), que no tienen aplicación con formatos raster. La tendencia en los últimos

Componente	Teledetección	SIG raster	SIG vectorial
Ordenador central	+	+	+
Memoria externa	+	+	+
Unidades de respaldo	+	+	+
Digitizador	*	+	+
Escáner	*	+	+
Impresoras de Inyección	+	+	*/+
Trazador de plumas	–	–	+/*
Filmadoras	+	+	+

Tabla 9.1 - *Afinidades entre la Teledetección y los SIG en cuanto a componentes físicos (se indica cuando el componente es muy comúnmente utilizado +, sólo de modo esporádico *, o nunca –)*

años iguala este aspecto; ya que cada vez son más frecuentes los trazadores raster (de inyección de tinta), en muchos casos más rápidos y económicos que los trazadores de plumas convencionales.

Respecto al *software*, las relaciones con la teledetección también son muy diferentes si se trata de SIG raster o vectoriales. Ambos cuentan con procesos muy similares a los aplicados en teledetección: visualización, correcciones geométricas, superposición de capas, operaciones aritméticas o filtrajes. Ahora bien, la forma concreta de resolver estos procesos es muy distinta en ambas estructuras de almacenamiento. Una transformación de mapas en un SIG vectorial implica una serie de problemas geométricos bastante complejos, ya que precisa una definición topológica de cada una de las transformaciones (Bosque, 1992). Por su parte, la estructura raster está muy cercana a la de una imagen digital, con la sola variante de que éstas son variables de intervalo (cuantitativas, en una escala continua, normalmente entre 0 y 255), mientras las almacenadas en un SIG son habitualmente nominales (corresponde a información categorizada, clases temáticas). Esto explica que algunos procesos sean específicos de cada técnica. Los realces del contraste, filtros, índices de vegetación, análisis de componentes principales, o clasificación numérica sólo tienen sentido cuando se trata de variables medidas en una escala numérica continua (ND, valores de radiancia, temperatura o reflectividad), mientras los filtros modales, las operaciones lógicas o los análisis de proximidad, exigen una categorización previa de la información[1].

9.4. Los SIG como apoyo a la teledetección

A lo largo de esta obra hemos visto en diversos capítulos la importancia de contar con información auxiliar para corregir algunos errores incluidos en las imágenes (caps. 6.5 y 7.1.2), así como para refinar la clasificación de diversas categorías (cap. 7.2). Modelos digitales de elevación (MDE), mapas de suelos, límites administrativos, regiones ecológicas o parcelas catastrales son ejemplos de variables cartográficas que pueden enriquecer notablemente el análisis digital de las imágenes.

Lo más común en los últimos años es que esta información auxiliar provenga de un SIG, cuyos datos sean ajustados geométricamente a las imágenes o viceversa, mediante los oportunos procesos de corrección (cap. 6.5).

Esa información no espectral puede incorporarse al tratamiento de las imágenes en varias fases:

[1] Sobre las escalas de medida pueden consultarse, entre otros, Tomlin (1990) y Bosque (1992).

(i) Previamente a la clasificación. Algunos campos de gran interés son la incorporación de un MDE en sectores de topografía accidentada, de cara a refinar la corrección geométrica y radiométrica de las imágenes, paliando la distorsión en ellas incluida por el relieve: efecto de sombras y geometría de adquisición, fundamentalmente. También puede ser conveniente incorporar información auxiliar para estratificar la imagen en sectores más homogéneos —por ejemplo, desde el punto de vista de las condiciones bioclimáticas o de la fisiografía local— con objeto de clasificar digitalmente áreas más similares, evitando la excesiva dispersión que puede presentarse en algunas categorías (Núñez et al., 1983).

(ii) Durante la clasificación. En esta fase, los datos auxiliares pueden ser de gran ayuda, tanto en la correcta delimitación de los campos de entrenamiento —si se opta por la clasificación supervisada—, como en el reconocimiento temático de los grupos espectrales (*clusters*), caso de emplear la no supervisada. Puesto que los áreas de entrenamiento sirven para definir estadísticamente a las clases que se intenta identificar, resulta clave delimitarlas apropiadamente, ya sea a partir del trabajo de campo, ya de una cartografía temática de la zona, suficientemente fiable. Si se opta por la clasificación no supervisada, la información almacenada en un SIG puede facilitar la adscripción temática de los grupos espectrales definidos por el ordenador.

Las variables auxiliares pueden emplearse también como nuevas bandas para la clasificación, aportando una dimensión no-espectral para la discriminación de determinadas clases. Éste es el caso de incluir MDE como variable adicional en la clasificación, reduciendo así el efecto de la topografía local, si no se han abordado correcciones radiométricas previas (Franklin et al., 1986). En los clasificadores convencionales, esta variable puede ser fácilmente introducida, ya que está medida, al igual que las imágenes, en escala de intervalo. Otras variables geográficas, como suelos o regiones biogeográficas, son más complicadas de integrar en estos criterios de clasificación, aunque sí podrían incluirse en aquéllos que no requieran variables cuantitativas (por ejemplo, los basados en redes neuronales).

(iii) Después de la clasificación. Una primera aportación de los SIG en esta fase atañe a la propia verificación de las clasificaciones. La información almacenada en estos sistemas permite diseñar los campos test, para construir la matriz de confusión (cap. 8), de cara a valorar cuantitativamente la precisión alcanzada en la clasificación.

Además, las variables auxiliares pueden servir para re-asignar algunas categorías, en caso de que no hayan sido discriminadas sólo a partir de información espectral (Hutchinson, 1982). Por ejemplo, algunas especies de cultivos, de similar comportamiento espectral, podrían discriminarse gracias al tipo de suelos sobre los que se asientan. De esta forma, bastaría contar con esa variable auxiliar,

suelo, para que la identificación fuera certera. Un ejemplo de este enfoque de clasificación integrado es el mapa global de cobertura del suelo de EE.UU., realizado a partir de una larga secuencia de imágenes AVHRR y diversas variables biogeográficas. A partir de las imágenes se obtuvieron los grupos espectrales básicos, que fueron etiquetándose, y en su caso discriminándose, a partir de mapas de regiones climáticas, suelos, áreas ecológicas, modelos digitales de elevación, etc. para el conjunto del país (Brown et al., 1993).

Otro aspecto de gran interés hace referencia al error de frontera, frecuentemente encontrado en áreas de transición en donde la definición de un píxel puede resultar ambigua, ya que, de hecho, corresponde a la respuesta espectral de dos o más cubiertas distintas. Un procedimiento para reducir la influencia de este error sería incluir, desde un SIG, los bordes que definen las distintas parcelas, modificando la pertenencia de los píxeles situados en esos límites.

(iv) Un último aspecto que puede considerarse hace referencia a la visualización de resultados. La integración de la teledetección y los SIG, permite ampliar notablemente las posibilidades gráficas de la cartografía convencional, facilitando su análisis visual al público profano. Algunas experiencias en esta línea son la realización de perspectivas tri-dimensionales, a partir de una imagen original o clasificada y de un modelo digital de elevación (fig. 9.2*), o la animación informática de paisajes.

9.5. La teledetección como fuente de datos para un SIG

9.5.1. El acceso a la información geográfica

Entre los siglas que definen a los SIG, a nuestro juicio resulta evidente que la más importante es la central, esto es la Información, puesto que el término Geográfica no es más que un calificativo de ésta, y el de Sistemas puede aplicarse a otras muchas aplicaciones informáticas. Los SIG, en definitiva, sólo son herramientas para la mejor gestión de la información disponible sobre el territorio: no permiten por sí solos generarla. En otras palabras, si la información almacenada en un SIG no es suficientemente fiable, está anticuada o es incompleta, de nada sirve contar con un soporte físico o lógico muy poderoso, pues ese SIG será de poco provecho en la solución de los problemas reales que afectan al territorio. Los SIG sin información de suficiente calidad son únicamente fuegos artificiales, vistosos pero inútiles.

En definitiva, resulta imprescindible que el SIG incorpore una serie de variables geográficas elementales (litología, morfología, suelos, datos climáticos,

vegetación, cultivos, datos censales, etc.), a la escala y con el nivel de precisión adecuado, y debidamente actualizadas. Puesto que esas variables son comúnmente generadas por distintas agencias, que, a su vez, pueden haber contratado el trabajo a múltiples intérpretes, la integración de esas variables en el SIG puede ser muy compleja, tanto desde el punto de vista temático como geométrico (Mounsey, 1991). En consecuencia, no sólo es necesario que exista una buena información geográfica, sino también que pueda integrarse en una base de datos coherente. Esto implica coordinación, tanto entre los diversos grupos que han generado cada variable (en el seno de una institución), como también entre las distintas instituciones con responsabilidades cartográficas.

Con mucha frecuencia, ambos aspectos no se garantizan adecuadamente en nuestro país. Por un lado, aún faltan determinados inventarios cartográficos, tan vitales para la planificación física, como es el caso de la cartografía de suelos o geomorfológica. Por otro, no existe una clara conexión entre los organismos que generan la información. Esto implica, en muchas ocasiones, duplicar esfuerzos y presupuestos, ya sea porque la información generada por estos organismos no resulta intercambiable, porque no se han arbitrado canales apropiados para la distribución pública de esa información, o, simplemente, porque no se conoce, lo que enfatiza el interés de elaborar un directorio de bases de datos disponibles para el conjunto del país.[2]

La teledetección espacial, por sí sola, no puede resolver este problema, pero puede contribuir a paliarlo al facilitar datos de libre adquisición, en formatos estándar. A nuestro juicio, el aporte de esta técnica a los SIG, se centra principalmente en la obtención de ciertas variables de interés (fase de inventario cartográfico), y en la actualización de información ya generada. A continuación analizamos con más detalle ambos aspectos.

9.5.2. Fase de inventario

La teledetección, como hemos visto en capítulos precedentes, puede resultar una herramienta idónea para cartografiar determinadas variables: temperatura del agua del mar, contenido en clorofila, cobertura de nieve, rendimientos del cultivo, ocupación del suelo, etc., aunque la lista puede ampliarse si se confirman las tendencias hacia sensores más sofisticados, con mayor resolución espacial, espectral o temporal. En algunos casos, estas aplicaciones abarcan campos ya recogidos por otros métodos más tradicionales, como la fotografía aérea o los trabajos de campo. El empleo de la teledetección, en estas

[2] Resulta muy interesante, en este sentido, el directorio elaborado por la CEPAL para las bases de datos y proyectos S.I.G. de Chile (CEPAL, 1991).

situaciones, se justifica si ofrece menores costes y/o mayor rapidez que los medios ya utilizados, manteniendo la precisión requerida. En otros casos, las aplicaciones que ofrece la teledetección son relativamente originales, pues resultan inabordables, a un precio razonable, con las técnicas convencionales (cartografía de la clorofila en el agua, detección de vertidos incontrolados de petróleo). En síntesis, el empleo de esta técnica será recomendable, a nuestro juicio, en las siguientes situaciones:

- (i) cuando el fenómeno a cartografiar se sitúe en áreas de difícil acceso, en donde los trabajos de campo resulten muy costosos (cinturón tropical, por ejemplo),
- (ii) cuando se pretenda una cobertura global de esa variable[3],
- (iii) cuando requiera observación en regiones no visibles del espectro (temperatura, detección de incendios),
- (iv) cuando precise una frecuencia temporal muy alta (dinámica atmosférica),
- (v) cuando sea necesario contar con una evaluación muy rápida del fenómeno.

Además de en estos contextos, la teledetección puede ser una alternativa muy conveniente cuando se requiera digitizar la información resultante, siempre que la escala de trabajo y el nivel de desagregación de la leyenda sean abordables a partir de la imagen de satélite. Al tratarse de información ya digital, las imágenes de satélite pueden integrarse con relativa facilidad, como luego veremos, en un SIG, obviando la labor de digitización, imprescindible en otras técnicas. No hemos de olvidar que la mayor parte de los países del mundo no cuentan con una cartografía digital suficientemente extendida (Rhind y Clark, 1988): la mayor parte de la información geográfica disponible está constituida por mapas en papel, frecuentemente de distintas escalas y proyecciones. Numerosos autores están de acuerdo en que la digitización de esta cartografía resulta la labor más compleja y costosa en el establecimiento de un SIG (Burrough, 1986; Star y Estes, 1990). Además, es la partida más costosa en el desarrollo y mantenimiento de la base de datos (hasta un 70% en la experiencia del servicio forestal norteamericano: Lachowski et al., 1992).

Existen diversos métodos para convertir estos mapas a formato numérico, pero ninguno, hoy por hoy, es completamente satisfactorio. La codificación manual no representa una solución operativa. El empleo de una mesa de digitización facilita la obtención automática de coordenadas, pero también resulta un proceso lento y laborioso, que requiere una detallada depuración de errores. La digitización automática mediante escáner es el recurso más habitual para organismos cartográficos. Sin embargo, precisa un importante trabajo de edición para pulir

[3] Por global entendemos aquí del orden de cientos de miles a millones de kilómetros cuadrados

posibles errores en la codificación de líneas o en la formación de la topología del mapa. Por último, las cámaras de vídeo o los restituidores digitales, pueden cumplir misiones específicas —por ejemplo en la obtención del modelo digital de elevaciones—, pero no resuelven la entrada de otras variables de gran interés en estudios medio-ambientales.

Además de la lentitud y elevado coste del proceso, la entrada de información en un SIG no está exenta de errores. Las causas más importantes de estos defectos son:

(i) las inexactitudes en la digitización (polígonos mal etiquetados, desplazamiento de líneas, generalización de elementos), y

(ii) la falta de criterios homogéneos entre las personas que compilan la información base.

En consecuencia, no se trata de introducir indiscriminadamente la cartografía disponible, sino de seleccionar la más precisa y duradera, confiando a otros métodos la obtención de nuevas variables o la actualización de las existentes.

9.5.3. El problema de la actualización

Realizar un inventario cartográfico es sólo una primera parte en la generación de un SIG operativo. El paso siguiente es mantener esa información al día, recogiendo aquellos cambios que se hayan producido entre la fecha de realización del mapa y la actual. En muchas ocasiones, la cartografía que pretende introducirse en un SIG no representa fidedignamente el estado actual del territorio, sino una situación obsoleta, que puede invalidar cualquier análisis posterior de esa información.

Las imágenes adquiridas desde el espacio ofrecen una cobertura periódica del territorio, cubriéndolo exhaustivamente en ciclos bastante cortos (cadencias entre media hora, para los satélites geoestacionarios, y 30 días, para el satélite ERS). Esto permite obtener una visión actualizada de la superficie que se observa, así como seguir la evolución temporal de determinados fenómenos muy dinámicos: crecimiento urbano, estado de los cultivos, inundaciones, erupciones volcánicas, etc. (ver cap. 7.3). Más aún, la agilidad que proporciona la interpretación digital facilita obtener un resultado en fecha bastante cercana a la obtención de la imagen, reduciéndose el período entre la realización y la disponibilidad del inventario.

Además de servir para generar nuevas variables, también las imágenes espaciales permiten actualizar la información ya almacenada en el SIG. Basta, por ejemplo, con utilizarlas como 'fondo' al que se superponen los límites de las áreas temáticas ya archivadas en el Sistema, una vez que ambos documentos ajusten

entre sí con precisión. Esa simple superposición visual facilita mucho la actualización de los recintos archivados, incorporando aquellos cambios ocurridos entre la fecha del inventario original y la correspondiente a la nueva imagen. Los ejemplos en el campo de la cartografía urbana son muy numerosos: nuevas construcciones, infraestructuras, ejes viarios, etc., aunque también son destacadas en otras aplicaciones, como es el caso de la actualización de espacios forestales en áreas quemadas, los cambios de cultivo, o la incorporación de nuevos caminos, carreteras y embalses.

9.6. Integración de imágenes en un SIG

Si bien las imágenes espaciales se adquieren en formato digital, también es posible abordar una interpretación visual de las mismas, por lo que la integración de imágenes espaciales en un SIG puede realizarse de distintas formas (fig. 9.3; Campbell, 1987):

(i) digitizando un mapa temático obtenido a partir de la interpretación visual de la imagen,
(ii) digitizando un mapa temático obtenido a partir de la clasificación digital de la imagen,
(iii) incorporando la imagen como "información de fondo", sobre la que se superponen los vectores almacenados en el SIG,
(iv) incorporando directamente el fichero generado por la clasificación digital de la imagen,
(v) integrando en el SIG los valores digitales originales o los obtenidos a partir de una transformación de la imagen (índices de verdor, estimación de la temperatura del agua, albedo, etc.).

Resulta obvio que estos dos últimas opciones resultan más convenientes, puesto que proporcionan información temática al SIG obviando la tarea de digitización. La clasificación digital de imágenes en teledetección permite generar un fichero numérico, en donde cada píxel cuenta con un valor entero que indica la categoría en la cual se incluyó. Por tratarse de una información digital, la integración en un SIG no resulta muy problemática.

La forma concreta de lleva a cabo esta integración depende, primordialmente, de la estructura de almacenamiento del SIG. Cuando se opta por una interpretación visual, las categorías deducidas de la imagen se definen por sus fronteras, por lo que el mapa resultante puede introducirse en un SIG de tipo vectorial. Asimismo, puede emplearse un programa de conversión vectorial a raster para conectarse con este tipo de formato. En ambos casos, resulta obligada la previa digitización del mapa, introduciendo tanto los límites de los polígonos que

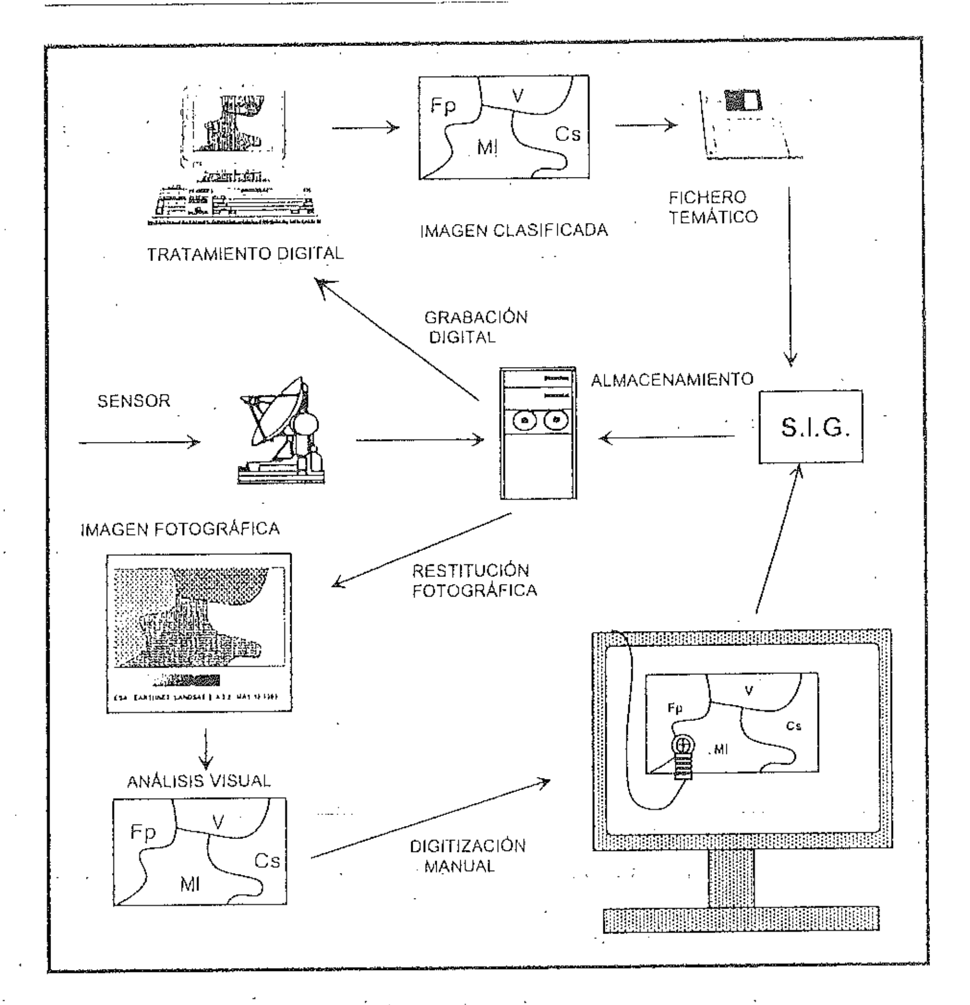


Fig. 9.3 - *Modalidades de conexión entre la teledetección y los SIG*

definen cada unidad temática, como la categoría a que pertenecen. En este sentido, la entrada de documentos es similar a la aplicable en el caso de cartografía convencional, siendo las ventajas de la teledetección su mayor accesibilidad temporal y menores errores geométricos.

Si se abordó una clasificación digital de las imágenes, la conexión resulta mucho más directa (fig. 9.4). El píxel puede considerarse como la unidad teselar, por lo que una imagen clasificada ofrece los mismos rasgos de un formato raster. En caso de contar con un SIG de estas características, la entrada de datos es inmediata, una vez que la imagen clasificada se ajusta al sistema de referencia elegido para el SIG (tipo de proyección y tamaño de la celdilla). En caso de trabajar con un SIG de tipo vectorial es preciso abordar la conversión raster a vectorial. Algu-

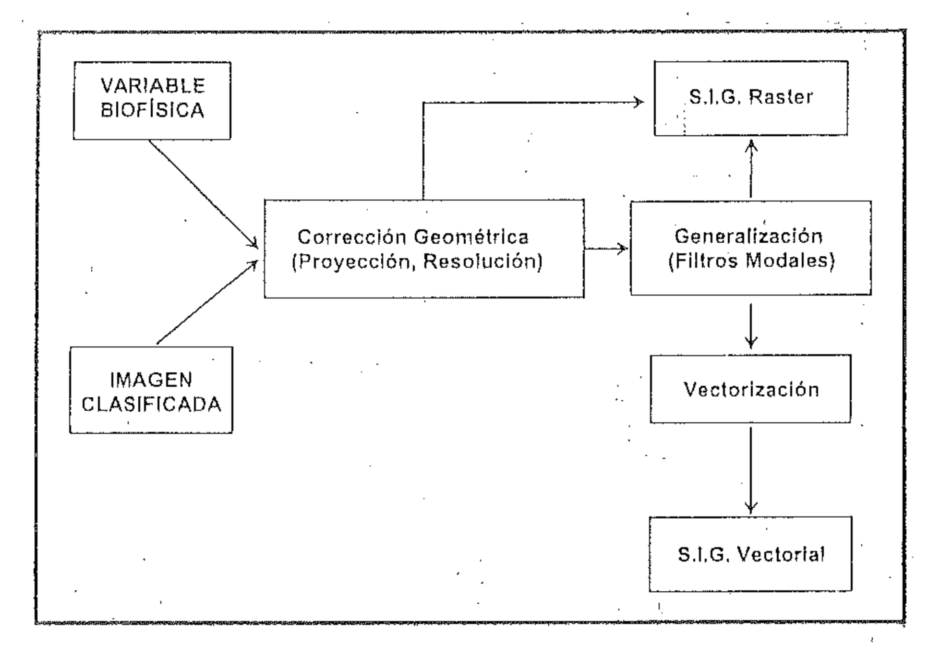


Fig. 9.4 - *Integración de imágenes digitales en un SIG*

nos sistemas de tratamiento digital de imágenes incorporan este tipo de algoritmos, si bien, suele tratarse de los equipos más costosos por la complejidad de los cálculos que esta operación implica. También existen algunos SIG que incorporan este tipo de programas. En cualquier caso, previamente a la conversión de formato, conviene generalizar severamente la clasificación digital, suprimiendo unidades temáticas de muy pocos píxeles.

Independientemente de los problemas que pueda traer consigo, la conexión de la teledetección espacial con un SIG es, a nuestro juicio, la conclusión más lógica del empleo de esta técnica. Brinda enormes posibilidades para la realización de estudios ambientales, evaluación de recursos, análisis de impactos, modelos de localización, etc. Con el apoyo de estos sistemas informáticos, el estudioso del medio ambiente podrá preocuparse más del análisis que de la obtención de la información. Será posible diseñar alternativas para un proyecto, estimar comportamientos futuros, simular efectos antes de que éstos sean irreparables.

9.7. Ejemplos de conexión entre la teledetección y los SIG

Se presenta, como conclusión, una muestra de las posibilidades que brindan estas tecnologías. El estudio comentado pretendía realizar una cartografía del

riesgo de incendios, combinando distintas variables que resultan críticas para el inicio o la extensión del fuego (Salas y Chuvieco, 1995; Chuvieco y Salas, 1996). El área de estudio se situó sobre las primeras estribaciones de la sierra de Gredos, entre las provincias de Ávila y Toledo, que presenta altos índices de riesgo para incendios forestales. Incluye los municipios de la vertiente norte (el Tiemblo, Burgohondo, Navaluenga) y sur de la cordillera (Sotillo de la Adrada, Casillas, Casavieja, etc.).

El modelo de integración de las variables parte de un esquema diseñado por el ICONA para determinar el peligro de incendios. Se basa en las condiciones meteorológicas, topografía local, vegetación y actividad humana (fig. 9.5). La capa de vegetación se obtuvo a partir de la clasificación digital de una imagen Landsat-TM, combinándola con información topográfica y textural. A partir de la información meteorológica puntual, se generaron mapas de temperatura máxima y humedad relativa, empleando técnicas de interpolación-extrapolación, mediante métodos de regresión. Finalmente, la capa de riesgo humano se obtuvo realizando un análisis de distancia a las principales vías de comunicación y campings-zonas de ocio (se establecieron 'pasillos' de riesgo de 150 m a ambos lados de estos elementos), en la medida en que resultaban indicadores de la actividad recreativa sobre el territorio (fig. 9.6).

Finalmente, las distintas variables se integraron en un índice sintético de riesgo, que considera la probabilidad de ignición, así como el riesgo asociado al comportamiento y a la actividad humana (fig. 9.7). En este caso, la fórmula para

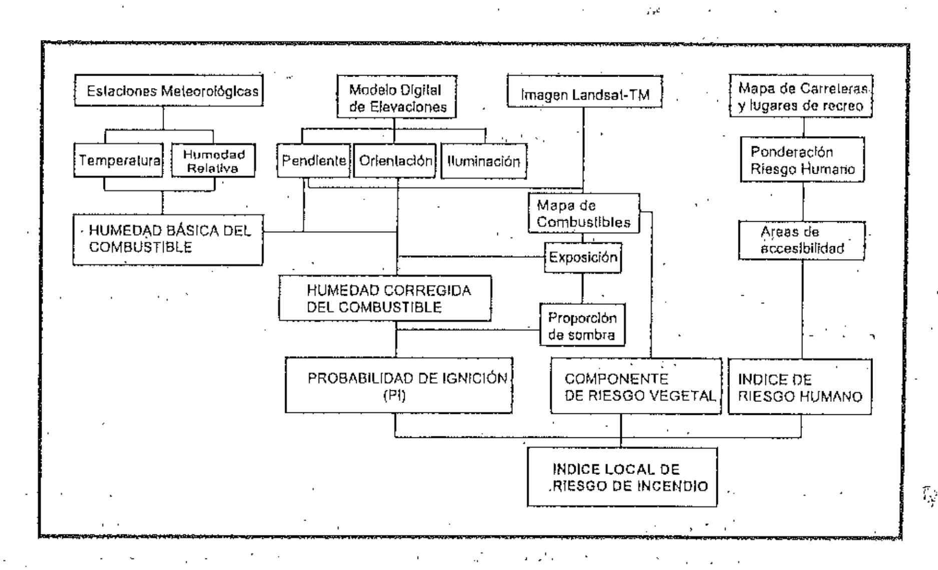


Fig. 9.5 - *Esquema del sistema de riesgo de incendio (adaptado del ICONA: Salas y Chuvieco, 1995)*.

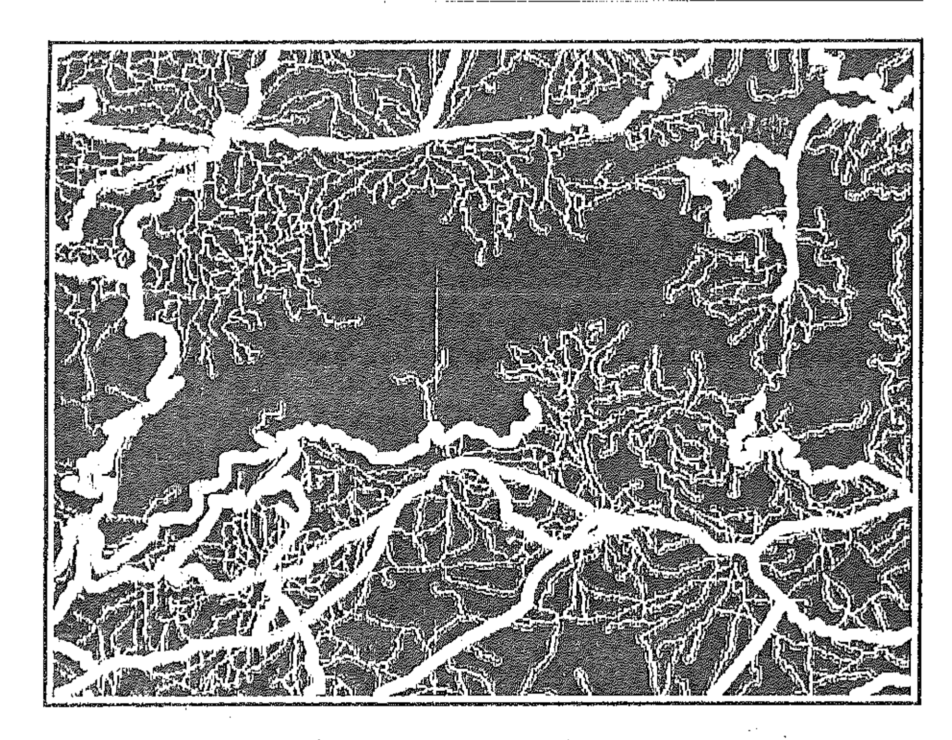


Fig. 9.6 - *Mapa de riesgo asociado a la actividad humana para el área de Gredos: en tonos claros a oscuros, se indica de mayor a menor grado de riesgo, de acuerdo a rangos de proximidad a carreteras, caminos y áreas de recreo*

obtener el mapa resultado implica una ponderación selectiva de los distintos factores de riesgo, pero podrían plantearse otros criterios, como la realización de cruces cualitativos entre mapas o el establecimiento de pesos mediante análisis de regresión local (Chuvieco y Salas, 1996). La cartografía resultante puede constituir un instrumento eficaz de gestión, complementando los sistemas de alerta convencionales. Permite estratificar un área relativamente amplia en niveles de riesgo, localizados con alta precisión geográfica. De esta forma, podrían concentrarse los esfuerzos de prevención en estos sectores (planificar quemas controladas, limpiezas manuales o mecánicas del sotobosque, diseñar líneas cortafuegos, localizar torres de vigilancia, etc.), paliando la escasez de recursos. Además, puede también resultar un instrumento eficaz en el combate, para conocer la accesibilidad a los distintos sectores, planificar las cuadrillas móviles, o localizar medios de extinción.

Existen múltiples ejemplos similares a éste en donde las imágenes de satélite se insertan en un flujo más global de análisis geográfico. Esperamos que este manual sea útil para que tales aplicaciones todavía se extiendan más, especialmente en los países de habla hispana, en donde resulta tan necesario armonizar el crecimiento económico con la preservación del medio ambiente.

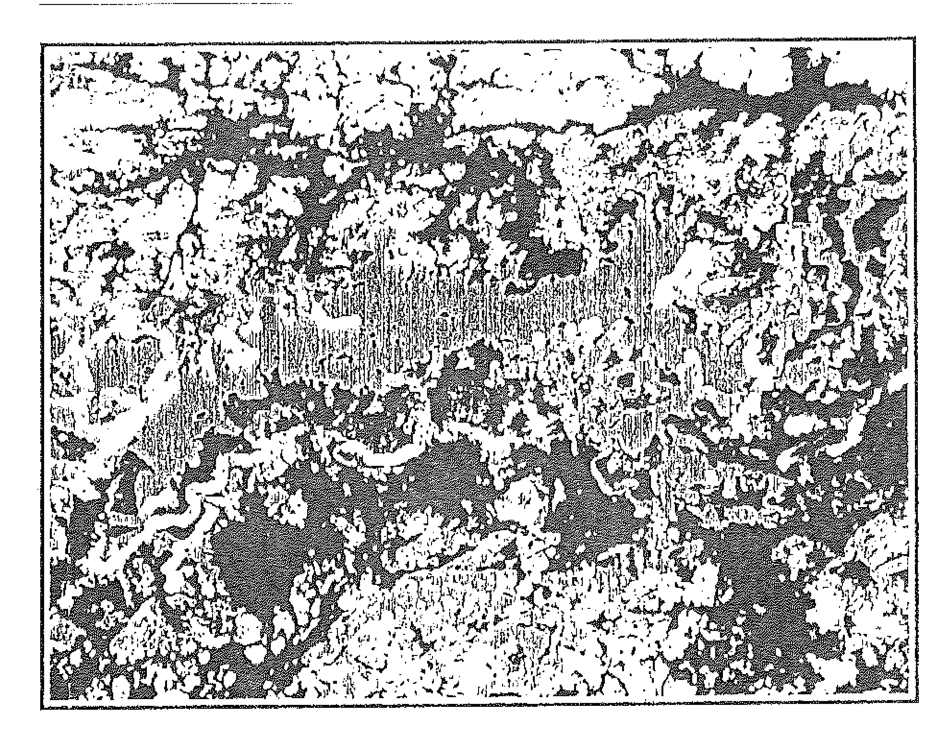


Fig. 9.7 - *Mapa de riesgo final de incendios: en tonos claros a oscuros, se indica de mayor a menor grado de riesgo*

REFERENCIAS

Adams, J.B., Sabol, D.E., Kapos, V., Almeida, R. y Roberts, M.O. (1995): Classification of multispectral images based on fractions of endmembers: application to Land-Cover change in the Brazilian Amazon, *Remote Sensing of Environment*, vol. 52, pp. 137-184.

Adeniyi, P.O. (1985): Digital analysis of multitemporal Landsat data for land use/land cover classification in a semi-arid area of Nigeria, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 51, pp. 1761-1774.

Adeniyi, P.O. (1987): Using remotely sensed data for census surveys and population estimation in developing countries: examples from Nigeria, *Geocarto International*, vol. 2, pp. 11-32.

Ahern, F.J., Erdle, T., Maclean, D.A. y Kneppeck, I.D. (1991): A quantitative relationship between forest growth rates and Thematic Mapper reflectance measurements, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 12, pp. 387-400.

Alía, M., Martín, C., Ubanell, A.G. y Muñoz, L. (1976): Determination by means of Landsat images of different geological structures in the central areas of the Iberian Plateau, en *Thematic Mapping, Land Use, Geological Structure and Water Resources in Central Spain* (R. Núñez de las Cuevas, Ed.), NASA Project 28760, pp. 172-208.

Allan, J.A. (1986): Remote sensing of agricultural and forest resources from space, *Outlook on Agriculture*, vol. 15, pp. 65-69.

Allan, T.D. Ed. (1983): *Satellite Microwave Remote Sensing*, Ellis Howard Ltd., New York.

Alonso, M., Camarasa, A., Chuvieco, E., Kyun, Y., Martín, M.P. y Salas, F.J. (1995): Estimating fuel moisture and fire danger from NOAA-AVHRR data, en *Remote Sensing and G.I.S. Applications to Forest Fire Management* (E. Chuvieco, Ed.), Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, pp. 123-128.

Alonso, M., Camarasa, A., Chuvieco, E., Cocero, D., Kyun, Y., Martín, M. P. y Salas, F.J. (1996): Estimating temporal dynamics of fuel moisture

content of Mediterranean species from NOAA-AVHRR data, *EARSeL Advances in Remote Sensing* (en prensa).

Anderson, J.R. (1971): Land use classification schemes, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 37, pp. 379-387.

Anderson, J.R., Hardy, E.E., Roach, J.T. y Witmer, R.E. (1976): *A Land Use and Land Cover Classification System for Use with Remote Sensor Data*, U.S.Geological Survey Prof. Paper 964, Washington, D.C.

Arbiol, R., Muns, M.T., Romeu, J. y Viñas, O. (1985): Estudi de la simulació SPOT sobre Catalunya, *Revista Catalana de Geografía*, vol. 1, pp. 26-44.

Aronoff, S. (1982): Classification accuracy: a user approach, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 48, pp. 1299-1307.

Aronoff, S. (1989): *Geographic Information Systems: a management perspective*, WDL Publications, Ottawa.

Asrar, G. (1990): Mission to Planet Earth: A global change program, en *Proc. 16th Annual Conference of the Remote Sensing Society*, Univ. College, Swansea, pp. i-v.

Asrar, G., Myneni, R.M. y Kanemasu, E.T. (1989): Estimation of plant canopy attributes from spectral reflectance measurements, en *Theory and Applications of Optical Remote Sensing* (G. Asrar, Ed.), Wiley, New York, pp. 252-296.

Astaras, T. y Silleos, N. (1984): Land classification of part of central Macedonia (Greece) by the use of remote-sensing techniques, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 5, pp. 289-302.

Atkinson, P., Cushnie, J.L., Townshend, J.R.G. y Wilson, A. (1985): Improving Thematic Mapper land cover classification using filtered data, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 6, pp. 955-961.

Au, K.N. Ed. (1993): *Cities of the world as seen from space*, Geocarto International Centre, Hong-Kong.

Baret, F. (1995): Use of spectral reflectance variation to retrieve canopy biophysical characteristics, en *Advances in Environmental Remote Sensing* (F.M. Danson y S.E.Plummer, Eds.), John Wiley & Sons, Chichester, pp. 33-51.

Barret, E.C. (1974): *Climatology from Satellites*, Methuen, London.

Barret, E.C. y Curtis, L.F. (1992): *Introduction to Environmental Remote Sensing, 2nd. Edition*, Chapman & Hall, London.

Batista, G.T. y Tucker, C.J. (1991): Accuracy of digital classification versus visual interpretation of deforestation in Amazon, en *Proc. V Simposium Latinoamericano de Percepción Remota*, Cuzco, pp. 407-423.

Baudot, Y. (1990): Integration of high-quality remote sensing images with low cost geographical information systems, en *Proc. EGIS'90*, Utrecht, pp. 40-46.

Beaven, P.J. (1988): A very low-cost microcomputer-based image processor, en *Digital Image Processing in Remote Sensing*, (J.P. Muller, Ed.), Taylor & Francis, London, pp. 123-133.

Beer, J.S., Sijmons, K. y Weinreich, H. (1978): Intensity and colour coding of relief and ground cover on PC transformed Landsat data, *ITC Journal*, vol. 78-2, pp. 347-352.

Belward, A.S. (1991): Remote Sensing for vegetation monitoring on regional and global scales, en *Remote Sensing and Geographical Information Systems for Resource Management in Developing countries*, (A.S. Belward y C.R.Valenzuela, Eds.), Kluwer Academic, Dordrecht, pp. 167-187.

Bendiktsson, J.A., Swain, P.H. y Ersoy, O.K. (1990): Neural network approaches versus statistical methods in classification of multisource remote sensing data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28, 4, pp. 540-552.

Benson, A.S. y Degloria, S. (1984): Interpretation of Landsat-4 Thematic Mapper and Multispectral Scanner data for forest surveys, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 51, pp. 1281-1289.

Benson, B.J. y MacKenzie, M.D. (1995): Effects of sensor spatial resolution on landscape structure parameters, *Landscape Ecology*, vol. 10, pp. 113-120.

Berg, A. y Galli, S. (1980): Some significant results of a remote sensing experiment under European conditions (AGRESTE project), *International Journal of Remote Sensing*, vol. 1, pp. 3-9.

Bernstein, R. (1978): Digital image processing of Earth observation sensor data, en *Digital Image Processing for Remote Sensing*, (R. Bernstein, Ed.), IEEE Press, New York, pp. 55-72.

Bernstein, R., Lotspiech, J.B., Myers, J., Kolsky, H.G. y Lees, R.D. (1984): Analysis and processing of Landsat-4 sensor data using advanced image processing techniques and technologies, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE22, pp. 192-221.

Berry, B.J. y Baker, A.M. (1968): Geographic Sampling, en *Spatial Analysis* (B.J. Berry y D.F. Marble, Eds.), Englewood Cliffs, New Jersey, pp. 91-100.

Bhargava, D.S. y Mariam, D.W. (1991): Spectral reflectance relationships to turbidity generated by different clay materials, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 56, pp. 225-229.

Bischof, H., Schneider, W. y Pinz, A.J. (1992): Multispectral classification of Landsat images using neural networks, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, pp. 482-489.

Bishop, Y., Fienberg, S. y Holland, P. (1975): *Discrete Multivariate Analysis: Theory and Practice*, MIT Press, Cambridge.

Blom, R.G. y Daily, M. (1982): Radar image processing for rock-type discrimination, *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, vol. GE20, pp. 343-351.

Bonn, F. y Rochon, G. (1992): *Précis de Télédétection*, Québec, Presses de l'Université du Québec.

Booth, D.J. y Oldfield, R.B. (1989): A comparison of classification algorithms in terms of speed and accuracy after the applications of a

post-classification modal filter, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 10, pp. 1271-1276.

Bosque, J. (1992): *Sistemas de Información Geográfica*, Madrid, Rialp.

Bosque, J., Chuvieco, E., Navalpotro, P. y Sancho, J. (1991): Factores en la dinámica de la ocupación del suelo (Comarca de los Montes, Castilla La Mancha, España), en *III Conferencia Latinoamericana sobre Sistemas de Información Geográfica*, Viña del Mar, pp. 355-362.

Brachet, G. (1986): SPOT: The first Operational Remote Sensing Satellite, en *Satellite Remote Sensing for Resources Development* (K.H. Szekielda, Ed.), Graham and Trotman Ltd, London, pp. 59-80.

Briggs, J. y Nellis, D. (1991): Seasonal variation of heterogeneity in the tallgrass prairie: a quantitative measure using remote sensing, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 57, pp. 407-411.

Bronsveid, M.C. y Luderus, F.J.D. (1982): *Analysis of Multi-temporal Data for the Identification of Land Use and crops (Case Study on the Mérida Region in the Province of the Badajoz, SW Spain)*, ITC-IBM Scientific Center, Madrid.

Brookes, A.J. (1975): *Photo Reconnaissance: The Operational History*, Ian Allan, London.

Brown, J.F., Loveland, T.R., Merchant, J., Reed, B.C. y Ohlen, D.O. (1993): Using multisource data in global land-cover characterization: concepts, requirements, and methods, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 59, pp. 977-987.

Bruce, B. y Hormsby, J.K. (1987): A Canadian perspective on the application of satellite remote sensing to regional geobotany, *Geocarto International*, vol. 1, pp. 53-59.

Bruneau, M. y Gautier, B. (1981): Cartographie diachronique de l'occupation du sol en milieu tropical densement peuple (Thailande), en *4eme Coll. Inter. du GDTA*, Toulousse, pp. 230-240.

Buchheim, M.P. y Lillesand, T.M. (1989): Semi-automated training field extraction and analysis for efficient digital image classification, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 55, pp. 1347-1355.

Bullard, R.K. y Dixon-Gough, R.W. (1985): *Britain from Space. An Atlas of Landsat Images*, Taylor & Francis Ltd., London.

Burgan, R.E. (1995): Use of Remotely sensed data for fire danger estimation, en *Int. Workshop on Remote Sensing and GIS applications to forest fire management* (E. Chuvieco, Ed.), Universidad de Alcalá de Henares, Alcalá de Henares, pp. 87-97.

Burgan, R.E. y Hartford, R.A. (1993): *Monitoring Vegetation Greenness with Satellite Data*, USDA Forest Service, INT-297, Ogden.

Burrough, P.A. (1986): *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*, Clarendon Press, Oxford.

Byrne, G.F., Crapper, P.F. y Mayo, K.K. (1980): Monitoring land-cover change by Principal Component analysis of multitemporal Landsat Data, *Remote Sensing of Environment*, vol. 10, pp. 175-184.

Caetano, M.S., Mertes, L.A.K. y Pereira, J.M.C. (1994): Using Spectral Mixture Analysis for Fire Severity Mapping, en *Proc. 2° Int. Conf. on Forest Fire Research*, Coimbra, pp. 667-677.

Calvet, J. y Pascual, R. (1987): Estudio de alineaciones obtenidas a partir de imágenes radar del Seasat-SAR en el macizo del Montseny-Guilleries, *II Reunión Científica del Grupo de Trabajo en Teledetección*, pp. 41-47.

Campbell, J.B. (1987): *Introduction to Remote Sensing*, The Guilford Press, New York.

Carleton, A.M. (1991): *Satellite Remote Sensing in Climatology*, Belhaven Press, London.

Carper, W.J., Lillesansd, T.M. y Kiefer, R.W. (1990): The Use of Intensity-Hue-Saturation Transformation for merging SPOT pancromatic and multispectral image data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 56, pp. 459-467.

Carter, D.J. (1986): *The Remote Sensing Sourcebook*, McCarta Ltd., London.

Carter, P. y Stow, B. (1979): Clean-up of digital thematic maps of urban growth extracted from Landsat imagery, en *Remote Sensing and National Mapping*, (J. A. Allan y R. Harris, Eds.), Remote Sensing Society, Reading, pp. 27-40.

Casas Torres, J.M. y Chuvieco, E. (1987): Análisis visual de imágenes "Thematic Mapper" para el estudio urbano. El caso de la ciudad de Madrid, *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, vol. 7, pp. 399-412.

Caselles, V. (1987): La Utilidad del Semivariograma en estudios de teledetección, en *II Reunión Nacional del Grupo de Trabajo en Teledetección*, Valencia, pp. 121-129.

Caselles, V., Gandia, S. y Meliá, J. (1983): Significance of apparent temperature measurements carried out by the HCMM satellite over areas of vegetation, *Agricultural Meteorology*, vol. 30, pp. 77-82.

Caselles, V., Gandia, S. y Meliá, J. (1984): Use of satellites in frost forecasting: Siphes, en *Proc. IGARSS'84 Symposium*, ESA, Strasbourg, pp. 461-465.

Caselles, V. y López, M.J. (1989): An alternative simple approach to estimate atmospheric correction in multitemporal studies, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 10, pp. 1127-1134.

Caselles, V. y Sobrino, J.A. (1989): Determination of frosts in orange groves from NOAA-9 AVHRR Data, *Remote Sensing of Environment*, vol. 29, pp. 135-146.

Caselles, V., Coll, C., Rubio, E., Sospedra, F. y Valor, E. (1995): La medida de la temperatura y de la emisividad desde satélites: estado actual y perspectivas futuras, en *VI Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección*, Valladolid (en prensa).

Caselles, V., Coll, C., Valor, E. y Rubio, E. (1995): Mapping land surface emmissivity using AVHRR data: Application to la Mancha, Spain, *Remote Sensing Reviews*, vol. 12, pp. 311-333.

Castro, R. y Chuvieco, E. (1995): Clasificación digital de combustibles forestales a partir de imágenes de alta resolución y modelos digitales del terreno, *Boletín de la SELPER*, vol. 10, pp. 8-15.

CEPAL (1991): *Directorio de Proyectos y sus Bases de Datos en el Área de los Sistemas de Información Geográfica en Chile*, Santiago de Chile, Autor

Chang, A.T.C., Fuster, J.L. y Hall, D.K. (1990): Satellite sensor estimates of Northern Hemisphere snow volume, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 11, pp. 167-171.

Chapelle, E.W., Wood, F.W., McMurtrey, J.E. y Newcomb, W.W. (1984): Laser-induced fluorescence of green plants. 1: A technique for the remote detection of plant stress and species differentiation, *Applied Optics*, vol. 23, pp. 134-.

Chavez, P.S. (1986): Digital merging of Landsat TM and digitized NHAP data for 1:24.000-scale image mapping, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 52, pp. 1637-1646.

Chavez, P.S. (1988): An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data, *Remote Sensing of Environment*, vol. 24, pp. 459-479.

Chavez, P.S. (1989): Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multispectral images, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 55, pp. 1285-1294.

Chavez, P.S. y Kwarteng, A.Y. (1989): Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principal component analysis, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 55, pp. 339-348.

Chavez, P.S., Sides, S.C. y Anderson, J.A. (1991): Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT Panchromatic, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 57, pp. 295-303.

Chevrel, M., Courtois, M. y Weill, G. (1981): The SPOT satellite remote sensing mission, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 47, pp. 1163-1171.

Chica, M. (1988): *Análisis Geoestadístico en el Estudio de la Explotación de los Recursos Minerales*, Universidad de Granada, Granada.

Chicharro, E. (1978): Cartografía del uso del suelo sobre datos del Landsat, *Las Ciencias*, vol. 43, pp. 127-131.

Choudhury, B.J. y Nicholson, S.E. (1992): Synergistic use of multispectral satellite data for monitoring arid lands, en *TERRA-1: Understanding the Terrestrial Environment* (P.M. Mather, Ed.), Taylor and Francis, London, pp. 67-76.

Chuvieco, E. (1985a): Aportaciones de la teledetección espacial a la cartografía de ocupación del suelo, *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, vol. 5, pp. 29-48.

Chuvieco, E. (1985b): Análisis espectral, cartografía e inventario de tipos de ocupación a partir de imágenes Thematic Mapper, *Geographica*, vol. 27, pp. 117-129.

Chuvieco, E. (1986): *Análisis visual multiestacional de la ocupación del suelo en Madrid y Guadalajara: propuesta de cartografía a partir de imágenes espaciales*, Inst. de Economía y Geografía Aplicada, Madrid.

Chuvieco, E. (1992a): Teledetección, S.I.G. y Cambio Global, *Geographicalia*, vol. 29, pp. 33-55.

Chuvieco, E. (1992b): Fuentes bibliográficas para la enseñanza de la Teledetección, *Serie Geográfica*, vol. 2, pp. 81-111.

Chuvieco, E. (1992c): Software de bajo coste para la enseñanza del tratamiento digital de imágenes, *Serie Geográfica*, vol. 2, pp. 127-139.

Chuvieco, E. (1995): "Medición del cambio provocado por incendios forestales en la estructura del paisaje a partir de imágenes de satélite de alta y baja resolución", *V Conferencia Iberoamericana sobre Sistemas de Información Geográfica*, Mendoza (Argentina), pp. 435-450.

Chuvieco, E. (1996): Measuring changes in landscape pattern from satellite images: effects of large fire disturbances, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* (en revisión).

Chuvieco, E. y Sancho, J. (1986): Tratamiento visual y digital de las imágenes espaciales: aplicaciones docentes, *Didáctica Geográfica*, vol. 14, pp. 17-28.

Chuvieco, E. y Congalton, R.G. (1988a): Using cluster analysis to improve the selection of training statistics in classifying remotely sensed data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 54, pp. 1275-1281.

Chuvieco, E. y Congalton, R.G. (1988b): Mapping and inventory of forest fires from digital processing of TM data, *Geocarto International*, vol. 3, pp. 41-53.

Chuvieco, E. y Congalton, R.G. (1989): Application of remote sensing and Geographic Information Systems to forest fire hazard mapping, *Remote Sensing of Environment*, vol. 29, pp. 147-159.

Chuvieco, E. y Martínez, J. (1990): Visual versus digital analysis for vegetation mapping: some examples on Central Spain, *Geocarto International*, vol. 5, pp. 21-30.

Chuvieco, E. y Martín, M.P. (1994a): Global fire mapping and fire danger estimation using AVHRR images, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 60, pp. 563-570.

Chuvieco, E. y Martín, M.P. (1994b): A simple method for fire growth mapping using AVHRR channel 3 data, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 15, pp. 3141-3146.

Chuvieco, E. y Alonso, M. (1995): *Teledetección y Medio Ambiente*, Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid (Vídeo y memoria didáctica).

Chuvieco, E. y Salas, F.J. (1996): Mapping the spatial distribution of forest fire danger using G.I.S., *International Journal of Geographical Information Systems*, vol. 10, pp. 333-345.

Cicone, R. y Metzler, M.D. (1984): Comparison of Landsat MSS, Nimbus-7 CZCS, and NOAA-7 AVHRR features for land use analysis, *Remote Sensing of Environment*, vol. 14, pp. 257-265.

Cihlar, J., St.Laurent, L. y Dyer, J.A. (1991): Relation between the Normalized difference vegetation index and ecological variables, *Remote Sensing of Environment*, vol. 35, pp. 279-298.

Civco, D.L. (1989): Topographic normalization of Landsat Thematic Mapper digital imagery, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 55, pp. 1303-1309.

Civco, D.L. (1993): Artificial neural networks for land-cover classification and mapping, *International Journal of Geographic Information Systems*, vol. 7, pp. 173-186.

Clark, C. y Cañas, A. (1995): Spectral identification by artificial neural network and genetic algorithm, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 16, pp. 2256-2272.

Cliff, A.D. y Ord, J.K. (1973): *Spatial Autocorrelation*, Pion, London.

Cohen, W.B. (1991a): Response of vegetation indices to changes in three measures of leaf water stress, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 57, pp. 195-202.

Cohen, W.B. (1991b): Chaparral vegetation reflectance and its potential utility for assessment of fire hazard, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 57, pp. 203-207.

Cohen, W.P., Spies, T.A. y Bradshaw, G.A. (1990): Semivariograms of digital imagery for analysis of conifer canopy structure, *Remote Sensing of Environment*, vol. 34, pp. 167-178.

Cohen, W.B. y Spies, T.A. (1992): Estimating structural attributes of Douglas-fir / Western Hemlock forest stands from Landsat and SPOT imagery, *Remote Sensing of Environment*, vol. 41, pp. 1-17.

Colby, J.D. (1991): Topographic normalization in rugged terrain, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 57, pp. 531-537.

Coleman, A. (1968): *Land Use Survey Handbook*, Geographical Association, Isle of Thamet.

Coll, C., Caselles, V., Sobrino, J.A. y Valor, E. (1994): On the atmosphere dependence of the Split Window equation for land surface temperature, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 15, pp. 105-122.

Colwell, J.E. (1974): Vegetation canopy reflectance, *Remote Sensing of Environment*, vol. 3, pp. 175-183.

Colwell, R.N. Ed. (1983): *Manual of Remote Sensing. 2nd Edition*, American Society of Photogrammetry, Falls Church, Virginia.

Comas, D. y Ruiz, E. (1993): *Fundamentos de los Sistemas de Información Geográfica*, Barcelona, Ariel.

Comunidad Europea, Comisión de la (1993): *CORINE Land Cover. Guide Technique*. Luxembourg, Oficina de Publicaciones oficiales de la Comunidad Europea.

Conese, C., Gilabert, M.A., Maselli, F. y Bottai, L. (1993): Topographic normalization of TM scenes through the use of an atmospheric correction method and a digital terrain model, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 59, pp. 1745-1753.

Congalton, R.G. (1984): A comparison of five sampling schemes used in assessing the accuracy of land cover/land use maps derived from remotely sensed data, Tesis doctoral, Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg.

Congalton, R.G. (1988a): Using spatial autocorrelation analysis to explore the errors in maps generated from remotely sensed data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 54, pp. 587-592.

Congalton, R.G. (1988b): A comparison of sampling schemes used in generating error matrices for assessing the accuracy of maps generated from remotely sensed data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 54, pp. 593-600.

Congalton, R.G. (1991): A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data, *Remote Sensing of Environment*, vol. 37, pp. 35-46.

Congalton, R.G. y Mead, R.A. (1983): A quantitative method to test for consistency and correctness in photointerpretation, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 49, pp. 69-74.

Congalton, R.G., Oderwald, R.G. y Mead, R.A. (1983): Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate analysis statistical techniques, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 49, pp. 1671-1678.

Congalton, R.G., Stenback, J.M. y Barret, R.H. (1993): Mapping deer habitat suitability using remote sensing and geographic information systems, *Geocarto International*, vol. 8, pp. 23-33.

Coppin, P.R. y Bauer, M.E. (1994): Processing of multitemporal Landsat TM imagery to optimize extraction of forest cover change features, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 32, pp. 918-927.

Coppock, J.T. y Rhind, D.W. (1991): The History of GIS, en *Geographical Information Systems* (D. Maguire, M.F. Goodchild y D.W. Rhind, Eds.), Longman, London, pp. 21-43.

Cosentino, M.J., Woodcock, C.E. y Franklin, J. (1981): Scene analysis for wildland fire-fuel characteristics in a Mediterranean climate, en *Proc. 15th Inter. Symp. on Remote Sensing of Environment*, Ann Arbor, pp. 635-646.

Crapper, P.F. y Hynson, K.C. (1983): Change detection using Landsat photographic imagery, *Remote Sensing of Environment*, vol. 13, pp. 291-300.

Crist, E.P. y Cicone, R.C. (1984a): Comparisons of the dimensionality and feature of simulated Landsat 4 MSS and TM data, *Remote Sensing of the Environment*, vol. 14, pp. 235-246.

Crist, E.P. y Cicone, R.C. (1984b): Application of the tasseled cap concept to simulated Thematic Mapper data, *Photogrammetric Engineering of Remote Sensing*, vol. 50, pp. 343-352.

Crist, E.P. y Cicone, R.C. (1984c): A physically-based transformation of Thematic Mapper data the TM tasseled cap, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE22, pp. 256-263.

Curran, P. (1980): Remote Sensing systems for monitoring crops and vegetation, *Progress in Physical Geography*, vol. 4, pp. 315-341.

Curran, P.J. (1985): *Principles of Remote Sensing*, Longman, London.

Curran, P.J., Foody, G.M., Kondratyev, K.Y., Kozoderov, W. y Fechenko, P.P. (1990): *Remote Sensing of soils and vegetation in the USSR*, Taylor and Francis, London.

Curran, P.J. y Foody, G.M. (1994): Environmental Issues at Regional to Global Scales, en *Environmental Remote Sensing from Regional to Global Scales*, (G.M. Foody y P.J. Curran, Eds.), John Wiley & Sons, Chichester, pp. 1-7.

Curran, P.J. y Kupiec, J.A. (1995): Imaging spectrometry: a new tool for ecology, en *Advances in Environmental Remote Sensing* (F.M. Danson y S.E. Plummer, Eds.), John Wiley & Sons, Chichester, pp. 71-88.

Cushnie, J.L. (1987): The interactive effect of spatial resolution and degree of internal variability within land-cover types on classification accuracies, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 8, pp. 15-29.

Cushnie, J.L. y Atkinson, P. (1985): The effect of spatial filtering on scene noise and boundary detail in Thematic Mapper imagery, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 51, pp. 1483-.

Danjoy, W.A. y Sadowski, F.G. (1978): Use of Landsat in the study of forest classification in the tropical jungle, en *Proc. 12th Intern. Symp. Rem. Sens. of Environment*, Ann Arbor, pp. 947-951.

Danson, F.M., Plummer, S.E. y Briggs, S.A. (1995): Remote Sensing and the information extraction problem, en *Advances in Environmental Remote Sensing* (F.M. Danson y S.E. Plummer, Eds.), John Wiley & Sons, Chichester, pp. 171-177.

Davis, F.W. y Simonett, D.S. (1991): GIS and Remote Sensing, en *Geographical Information Systems*, (D. Maguire, M.F. Goodchild y D.W. Rhind, Eds.), Longman, London, pp. 191-213.

Davison, G.J. (1984): Ground control pointing and geometric transformation of satellite imagery, en *Location* (M. Steven, M. Dobson y P.M. Mather, Eds.), Proc. of Remote Sensing Society Workshop, Nottingham, pp. 45-59.

Deane, G.C. (1980): Preliminary evaluation of Seasat-1 SAR data for land use mapping, *Geographical Journal*, vol. 146, pp. 408-418.

DeFries, R.S. y Townshend, J.R.G. (1994): Global land-cover: comparison of ground-based data sets to classifications with AVHRR data, en *Environmental Remote Sensing from Regional to Global Scales* (G.M. Foody y P.J. Curran Eds.), John Wiley & Sons, Chichester, pp. 84-110.

Delbaere, B. y Gulinck, H. (1995): A review of landscape ecological research with specific interest to landscape ecological mapping, en *Remote Sensing in landscape ecological mapping* (B. Delbaere y H. Gulinck, Eds.), Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, pp. 3-28.

Dietrich, D.L. y Lachowski, H.M. (1978): Identification and delineation of urbanized areas using Landsat data, en *Proc. 12th Inter. Symp. on Remote Sensing of Environment*, Ann Arbor, pp. 1083-1090.

Dillworth, M.E., Whistler, J.L. y Merchant, J.W. (1994): Measuring Landscape Structure Using Geographic and Geometric Windows, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 60, pp. 1215-1224.

Dozier, J. (1989): Spectral Signature of Alpine Snow Cover from Lansat Thematic Mapper, *Remote Sensing of Environment*, vol.28, pp. 9-22.

Dozier, J. y Strahler, A.H. (1983): Ground investigations in support of remote sensing, en *Manual of Remote Sensing* (Colwell, Ed.), American Society of Photogrammetry, Falls Church, pp. 959-986.

Duda, R.D. y Hart, P.E. (1973): *Pattern Classification and Scene Analysis*, John Wiley & Sons, New York.

Eastman, J.R. (1993): *IDRISI. Version 4.1. Update manual*, Worcester, Ma., Clark University.

Eastman, J.R. y Fulk, M. (1993): Long sequence time series evaluation using standarized principal components, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 59, pp. 1307-1312.

Eastman, J.R., McKendry, J. y Fulk, M. (1994): *UNITAR Explorations in GIS Technology, vol. 1: Change and Time Series Analysis*, Geneve, Switzerland.

Ehrlich, D., Estes, J.E. y Sing, A. (1994): Applications of NOAA-AVHRR 1 Km. data for environmental monitoring, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 15, pp. 145-161.

Eidenshink, J.C. y Haas, R.H. (1992): Analyzing vegetation dynamics of land systems with satellite data, *Geocarto International*, vol. 7, pp. 53-61.

Elachi, C. (1982): Radar images of the Earth from space, *Scientific American*, vol. 247, pp. 46-53.

Elachi, C. (1987): *Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing*, John Wiley & Sons, New York.

Elvidge, C.D., Baugh, K.E., Kihn, E.; Kroehl, H.W. y Davis, E.R. (1995): Mapping city lights with nightime data from the DMSP Linescan System, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* (en prensa).

Emery, W.J., Brown, J. y Nowak, Z.P. (1989): AVHRR Image Navigation: Summary and Review, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 55, pp. 1175-1183.

ESA (1992): *ERS-1 System*, Noordwijk, ESA Publications Division.

Estes, J.E. y Simonett, D.S. (1975): Fundamentals of image interpretation, en *Manual of Remote Sensing*, 1st. Ed.(R.G. Reeves, Ed.), American Society of Photogrammetry, Falls Church, pp. 869-1076.

Eyton, J.R. (1983): Landsat multitemporal color composites, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 49, pp. 231-235.

Faust, N.L., Anderson, W.H. y Start, J.L. (1991): Geographic Information Systems and Remote Sensing Future Computing Environment, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 57, pp. 655-668.

Ferns, D.C. y Press, N.P. (1988): Microcomputers and mass storage devices for image processing, en *Digital Image Processing in Remote Sensing*, (J.P. Muller, Ed.), Taylor & Francis, London, pp. 105-121.

Ferris, J. y Congalton, R.G. (1989): Satellite and Geographic Information System estimates of Colorado River Basin snowpack, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 55, pp. 1629-1635.

Fisher, P.F. y Pathirana, S. (1990): The evaluation of fuzzy membership of land cover classes in the suburban zone, *Remote Sensing of Environment*, vol. 34, pp. 121-132.

Fitzpatrick-Lins, K. (1978): Accuracy and consistency comparisons of land use and land cover maps made from high-altitude photographs and Landsat multispectral imagery, *Journal Research U.S. Geological Survey*, vol. 6, pp. 23-40.

Flannigan, M.D. y Vonder Haar, T.H. (1986): Forest fire monitoring using NOAA satellite AVHRR, *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 16, pp. 975-982.

Foody, G.M. (1992): A fuzzy sets approach to the representation of vegetation continua from remotely sensed data: en example from lowland heath, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 58, pp. 221-225.

Foody, G.M. (1995): Using prior knowledge in artificial neural network classification with a minimal training set, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 16, pp. 301-312.

Foody, G.M. y Cox, D.P. (1994): Sub-pixel land-cover composition estimation using a linear mixture model and fuzzy membership functions, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 15, pp. 619-631.

Foody, G. y Curran, P. (1994): *Environmental Remote Sensing from Regional to Global Scales*, John Wiley & Sons, Chichester.

Francis, P. y Jones, P. (1984): *Images of Earth*, George Phillip and Son Ltd., London.

Franklin, J., Logan, T.L., Woodcock, C.E. y Strahler, A.H. (1986): Coniferous forest classification and inventory using Landsat and digital terrain data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE-24, pp. 139-149.

Fung, T. (1992): Land Use and Land Cover Change Detection with Landsat MSS and SPOT-HRV Data in Hong KOng, *Geocarto International*, vol. 7, pp. 33-40.

Fung, T. y LeDrew, E. (1987): Application of Principal Components Analysis to Change Detection, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 53, pp. 1649-1658.

Fung, T. y LeDrew, E. (1988): The determination of optimal threshold levels for change detection using various accuracy indices, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 54, pp. 1449-1454.

García, E., Bradshaw, R.P. y Ocaña, M.C. (1986): Análisis de los usos del suelo en la depresión de Antequera mediante la utilización del TM, en *I Reunión Científica del Grupo de Trabajo en Teledetección*, Barcelona, pp. 31-50.

Gates, D.M., Keegan, H.J., Schleter, J.C. y Weidner, V.R. (1965): Spectral properties of plants, *Applied Optics*, vol. 4, pp. 11-20.

GDTA-CEE (1982): *Recherche sur la Cartographie de l'Occupation des Sols par Teledetection*, IGN Département de Télédétection et de Cartographie Spatiale, Paris.

Gilabert, M.A., Conese, C. y Maselli, F. (1994): An atmospheric correction method for the automatic retrieval of surface reflectances from TM images, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 15, pp. 2065-2086.

Ginevan, M.E. (1979): Testing land-use map accuracy: another look, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 45, pp. 1371-1377.

Girard, C.M. (1981): Grassland mapping using satellite multitemporal data, en *Matching Remote Sensing Technologies and their Applications*, (C.M. Girard, Ed.), Remote Sensing Society, London, pp. 111-122.

Girard, M. C. y Girard, C.M. (1989): *Télédétection Appliquée. Zones tempérées et intertropicales*, Paris, Masson.

Goetz, A.F.H. (1991): Imaging spectrometry for studying Earth, Air, Fire and Water, *EARsel Advances in Remote Sensing*, vol. 1, pp. 3-15.

Gogineni, S., Ampe, J. y Budihardjo, A. (1991): Radar Estimates of Soil Moisture Over the Konza Prairie, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 12, pp. 1425-2432.

Goldin, S. y Rudahl, F. (1994): *Dragon System 4.0. User's guide*, Amherst, Massachusetts.

Gong, P. y Howarth, P.J. (1990a): The use of structural information for improving land-cover classification accuracies at the rural-urban fringe, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 56, pp. 67-73.

Gong, P. y Howarth, P.J. (1990b): An assessment of some factors influencing multispectral land-cover classification, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 56, pp. 597-603.

Gong, P., Marceau, O.J. y Howarth, P.J. (1992): A comparison of spatial feature extraction algorithms for land-use classification with SPOT-HRV data, *Remote Sensing of Environment*, vol. 40, pp. 137-151.

Gong, P., Miller, J.R. y Spanner, M. (1994): Forest canopy closure from classification and spectral unmixing of scene components. Multisensor evaluation of an open canopy, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 32, pp. 1067-1079.

Gonzalez, R.C. y Wintz, P. (1977): *Digital Image Processing*, Addison & Wesley, Reading, Mass.

González, F. y López, S. (1991): Using contextual information to improve land use classification of satellite images in central Spain, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 12, pp. 2227-2235.

Gordon, S.I. (1980): Utilizing Landsat imagery to monitor land use change: a case study in Ohio, *Remote Sensing of Environment*, vol. 9, pp. 189-196.

Gordon, D.K. y Philipson, R. (1986): A texture-enhancement procedure for separating orchard from forest in Thematic Mapper data, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 7, pp. 301-304.

Goward, S.N. (1989): Satellite bioclimatology, *Journal of Climate*, vol. 2, pp. 710-720.

Goward, S.N., Dye, D., Kerber, A. y Kalb, V. (1987): Comparison of North and South American biomes from AVHRR observations, *Geocarto International*, vol. 1, pp. 27-39.

Goward, S.N., Markham, B., Dye, D.G., Dulaney, W. y Yang, I. (1991): Normalized difference vegetation index measurements from the Advanced Very High Resolution Radiometer, *Remote Sensing of Environment*, vol. 35, pp. 257-277.

Green, K. (1994): The potential and limitations of remote sensing and GIS providing ecological information, en *Remote Sensing and GIS in Ecosystem Management* (V.A. Sample, Ed.), Island Press, Washington D.C., pp. 327-336.

Green, A.A., Berman, M., Switzer, P. y Maurice, D.C. (1988): A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications in noise removal, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE26, pp. 65-74.

Griffiths, G.H., Smith, J.M., Veitch, N. y Aspinall, R. (1993): The Ecological Interpretation of Satellite Imagery with special reference to Bird Habitats, en *Landscape Ecology and Geographic Information Systems* (R.Haines-Young, D.R.Green, y S.Cousins, Eds.), Taylor & Francis, London, pp. 255-275.

Grover, K.D., Quegan, S., Yanasse, C.C.F. y Dutra, L.V. (1995): Potential use of ERS-1 in Tropical Forest Monitoring a Study of the Tepajos National Forest, Brazil, *Earth Observation Quarterly*, vol. 48, pp. 12-15.

Guerif, M., Brisis, S. y Seguin, B. (1993): Combined NOAA-AVHRR and SPOT-HRV Data for assessing crop yields of semiarid environments, *EARSEL Advances in Remote Sensing*, vol. 2, pp. 110-123.

Gulinck, H., Walpot, D., Janssens, P. y Dries, I. (1991): The visualization of corridors in the landscape using SPOT data, en *Nature Conservation 2: The Role of Corridors* (D.Saunders; y R.J.Hobbs, Eds.), Beatty & Sons, Suney, pp. 9-17.

Gurney, C.M. y Townshend, J.R.G. (1983): The use of contextual information in the classification of remotely sensed data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 49, pp. 55-64.

Gutierrez, J. y Gould, M. (1994): *S.I.G.: Sistemas de Información Geográfica*, Síntesis, Madrid.

Guyot, G. y Gu, X.F. (1994): Effect of radiometric corrections on NDVI determined from SPOT-HRV and Landsat-TM data, *Remote Sensing of Environment*, vol. 49, pp. 169-180.

Haack, B.N. (1983): An analysis of Thematic Mapper simulator data for urban environments, *Remote Sensing of Environment*, vol. 13, pp. 265-275.

Haack, B., Bryant, N. y Adams, S. (1987): An assessment of Landsat MSS and TM data for urban and near-urban land-cover digital classification, *Remote Sensing of Environment*, vol. 21, pp. 201-213.

Hall, D.K. (1988): Assessment of Polar climate change using satellite technology, *Reviews of Geophysics*, vol. 26, pp. 26-39.

Hall, D.K. y Martinec, J. (1985): *Remote Sensing of Ice and Snow*, Chapman and Hall, London.

Hall, R.J., Crown, P.H. y Titus, S.J. (1984): Change detection methodology for aspen defoliation with Landsat MSS digital data, *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 10, pp. 135-142.

Hall, F.G., , Strebel, D.E., Nickeson, E. y Goetz, S.J. (1991a): Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multidate multisensor images, *Remote Sensing of Environment*, vol. 35, pp. 11-27.

Hall, F.G, Botkin, D.B., Strebel, D.E., Woods, K.D. y Goetz, S.J. (1991b): Large-scale patterns of forest succession as determined by remote sensing, *Ecology*, vol. 72, pp. 628-640.

Hand, D.J. (1981): *Discrimination and Classification*, John Wiley and Sons, New York.

Harnapp, V. (1978): Landsat imagery: a tool for updating land use in Gulf Coast Mexico, *Journal of Geography*, vol. 78, pp. 141-144.

Harper, D. (1983): *Eye in the Sky. Introduction to Remote Sensing*, Multiscience Publications Ltd., (2nd Edition), Montreal.

Harris, R. (1987): *Satellite Remote Sensing. An Introduction*, Routledge and Kegan Paul, London.

Harris, J.R., Murray, R. y Hirose, T. (1990): IHS transform for the integration of radar imagery with other remotely sensed data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 56, pp. 1631-1641.

Hart, W.G. (1975): The use of Skylab data to study the early detection of insect infestations and density and distribution of host plants, *NASA Earth Resources Survey Symposium*, vol. 1-A, pp. 203-220.

Hay, A.M. (1979): Sampling designs to test land-use map accuracy, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 45, pp. 529-533.

Henderson, R.M. (1983): A comparison of SAR brightness levels and urban land-cover classes, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 49, pp. 1585-1591.

Henebry, G.M. (1993): Detecting change in grasslands using measures of spatial dependence with Landsat-TM data, *Remote Sensing of Environment*, vol. 46, pp. 223-234.

Hepner, G., Logan, T., Ritter, N. y Bryant, N. (1990): Artificial neural network classification using a minimal training set: comparison to conventional supervised classification, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 56, pp. 469-473.

Hill, J. y Sturm, B. (1991): Radiometric correction of multitemporal Thematic Mapper data for use in agricultural land-cover classification and vegetation monitoring, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 12, pp. 1471-1491.

Hilwig, F.W. (1980): Visual interpretation of multitemporal Landsat data for inventories of natural resources, *ITC Journal*, vol. 2, pp. 297-327.

Hixson, M., Scholz, D., Fuhs, N. y Akiyama, T. (1980): Evaluation of several schemes for classification of remotely sensed data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 46, pp. 1547-1553.

Hlavka, C. y Spanner, M.A. (1995): Unmixing AVHRR imagery to assess clearcuts and forest regrowth in Oregon, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, pp. 788-795.

Ho, D. y Asem, A. (1986): NOAA AVHRR image referencing, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 7, pp. 895-904.

Hoffer, R.M. (1994): Challenges in developing and applying remote sensing to ecosystem management, en *Remote Sensing and GIS in Ecosystem Management* (V.A.Sample, Ed.), Island Press, Washington D.C., pp. 25-40.

Hoffer, R.M. y Fleming, M.D. (1978): *Mapping vegetative cover by computer-aided analysis of satellite data*, LARS Technical Report 011178, Purdue.

Hoffer, R.M. y Swain, P.H. (1980): Computer processing of satellite data for assessing agriculture, forest, and rangeland resources, en *Proc. 14th Intern. Soc. of Photog.*, Hamburg, pp. 437-446.

Hoge, F.E., Swift, R.N. y Yungel, J.K. (1983): Feasibility of airborne detection of laser-induced fluorescence emissions from green terrestrial plans, *Applied Optics*, vol. 22, pp. 2991-.

Holben, B.N. (1980): Spectral assessment of soybean leaf area and leaf biomass, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 46, pp. 651-656.

Holben, B.N. (1986): Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 7, pp. 1417-1434.

Holben, B.N. y Shimabukuro, Y.E. (1993): Linear mixing model applied to coarse spatial resolution data from multispectral satellite sensors, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 14, pp. 2231-2240.

Holz, R.K. (1985): *The Surveillance Science: Remote Sensing of Environment*, John Wiley & Sons, New York.

Hopkins, P.F., Maclean, A.L. y Lillesand, T.M. (1988): Assessment of Thematic Mapper imagery for forestry applications under lake states conditions, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 54, pp. 61-68.

Hord, R.M. (1982): *Digital Image Processing of Remotely Sensed Data*, Academic Press, New York.

Hord, R.M. (1986): *Remote Sensing. Methods and Applications*, John Wiley and Sons, New York.

Hord, R.M. y Brooner, W. (1976): Land use map accuracy criteria, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 42, pp. 671-677.

Hougham, A.M. (1987): *Use of NOAA AVHRR digital satellite data for precipitation and forest fire assessment*, Saskatchewan Research Council, Saskatoon.

Howarth, P.J. y Wickware, G.M. (1981): Procedures for change detection using Landsat digital data, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 2, pp. 277-291.

Hudson, W.D. y Ramm, C.W. (1987): Correct formulation of the kappa coefficient of agreement, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 53, pp. 421-422.

Huete, A.R. (1987): Spectral signatures and vegetation indices, en *II Reunión Nac. del Grupo de Trabajo en Teledetección*, Valencia, pp. 13-26.

Huete, A., Justice, C. y Liu, H. (1994): Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS, *Remote Sensing of Environment*, vol. 49, pp. 224-234.

Huffaker, R.M., Lawrence, T.R., Post, M.J., Priestley, J.T., Hall, F.F., Richter, R.A. y Keller, R.J. (1984): Feasibility studies for a global wind measuring satellite system (Wyndsat). Analysis of simulated performance, *Applied Optics*, vol. 23, pp. 2523-2534.

Hunt, E.R. y Rock, B.N. (1989): Detection of changes in leaf water content using near and middle-infrared reflectances, *Remote Sensing of Environment*, vol. 30, pp. 43-54.

Hutchinson, C.F. (1982): Techniques for combining Landsat and ancillary data for digital classification improvement, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 48, pp. 123-130.

Hyatt, E. (1988): *Keyguide to Information Sources in Remote Sensing*, Mansell Publ. Ltd., London.

IGBP (1992): *Global change: reducing uncertainties*, Royal Swedish Academy of Sciences, Stockholm.

Illera, P., Fernández, A. y Delgado, J.A. (1995): Fire monitoring in Spain using NOAA-thermal data and NDVI, en *Sensors and Environmental Applications of Remote Sensing* (Askne, Ed.), Barkema, Rotterdam, pp. 377-383.

Ingebritsen, S.E. y Lyon, R.J.P. (1985): Principal components analysis of multitemporal image pairs, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 6, pp. 687-695.

Irons, J.R. y Kennard, R.L. (1986): The utility of Thematic Mapper sensor characteristics for surface mine monitoring, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 52, pp. 389-396.

Jensen, J.R. (1981): Urban change detection mapping using Landsat digital data, *The American Cartographer*, vol. 8, pp. 127-147.

Jensen, J.R. (1983): Byophysical remote sensing, *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 73, pp. 111-132.

Jensen, J.R. (1995): President's inaugural address, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 61, pp. 835-840.

Jensen, J.R. (1996): *Introductory Digital Image Processing. A Remote Sensing Perspective*, (2nd ed.), Prentice Hall, Upper Saddle River N.J.

Jensen, J.R. y Dahlberg, R.E. (1983): Status and content of remote sensing education in the United States, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 4, pp. 235-245.

Jensen, J.R. y otros (Ed). (1983): «Urban/Suburban land use analysis», en *Manual of Remote Sensing* (Colwell, R.N., Ed.), American Society of Photogrammetry, Falls Church, UA.

Ji, W., Civco, D.L. y Kennard, W.C. (1992): Satellite remote bathymetry: a new mechanism for modelling, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 58, pp. 545-549.

Jiménez, J. y García, N. (1982): *Introducción al Tratamiento Digital de Imágenes*, Centro de Investigación UAM-IBM, Madrid.

Johnston, R.J. (1978): *Multivariate Statistical Analysis in Geography*, Longman, London.

Joly, G., Verger, F. y Crettez, J.P. (1983): Classification des donées Landsat unitemporelles et multitemporelles par la transformation de Karhunen-Loève. Application à l'Anse de l'Aiguillon, *L'Espace Géographique*, vol. 2, pp. 125-141.

Justice, C.O. y Townshend, J.R.G. (1981): The use of Landsat data for land cover inventories of Mediterranean lands, en *Terrain Analysis and Remote Sensing* (J.R.G. Townshend, Ed.), George Allen & Unwin, London, pp. 135-153.

Justice, C.O., Townshend, J.R.G., Holben, B.N. y Tucker, C.J. (1985): Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 6, pp. 1271-1318.

Kasischke, E.S., French, N.H., Harrell, P., Christensen, N.L., Ustin, S.L. y Barry, D. (1993): Monitoring of wildfires in Boreal forest using large area AVHRR NDVI composite image data, *Remote Sensing of Environment*, vol. 45, pp. 61-71.

Kasischke, E.S. y French, N.H. (1995): Locating and estimating the areal extent of wildfires in alaskan boreal forest using multiple-season AVHRR NDVI composite data, *Remote Sensing of Environment*, vol. 51, pp. 263-275.

Kaufman, Y. y Tanré, D. (1992): Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, pp. 261-270.

Kauth, R.J. y Thomas, G.S. (1976): The Tasseled Cap. A graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat, en *Proc. Symp. on Machine Processing of Remotely Sensed Data*, Purdue, pp. 41-51.

Kennedy, P. (1989): Monitoring the vegetation of Tunisian grazing lands using the Normalized Difference Vegetation Index, *Ambio*, vol. 18, pp. 119-123.

Kerdiles, H. y Grondona, M.O. (1995): NOAA-AVHRR NDVI decomposition and subpixel classification using linear mixing in the Argentinean Pampa, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 95, pp. 1303-1325.

Kerr, Y., Imbernon, J., De Dieu, G., Hautecoeur, O., Lagouarde, J.P. y Seguin, B. (1989): NOAA-AVHRR and its uses for rainfall and evapotranspiration monitoring, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 10, pp. 847-854.

Kerr, Y., Lagouarde, J.P. y Imbernon, J. (1992): Accurate land surface temperature retrieval from AVHRR data with use of an improved split window algorithm, *Remote Sensing of Environment*, vol. 41, pp. 197-209.

Ketting, R.L. y Landgrebe, D.A. (1975): Classification of multispectral image data by extraction and classification of homogeneous objects, *Proc. Symposium on Machine Classification of Remotely Sensed Data*, West Lafayette, pp. 1-11.

Kidwell, K.B. Ed. (1991): *NOAA Polar Orbiter Data Users Guide*, NOAA/NESDIS, Washington, D.C.

Kiefer, R.W. (1989): The 1988 ASPRS survey of photogrammetry and remote sensing programs and courses in the United States and Canada, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 55, pp. 114-121.

King, R.B. (1981): An evaluation of Landsat-3 RBV imagery for obtaining environmental information in Tanzania, en *Matching Remote Sensing Technologies and their Applications*, Remote Sensing Society, London, pp. 85-95.

Kleckner, R.L. (1982): Classification systems for natural resource management, en *Proc. Pecora VII Symposium*, Sioux Falls, pp. 65-70.

Knipling, E.B. (1970): Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation, *Remote Sensing of Environment*, vol. 1, pp. 155-159.

Kobayashi, T. (1987): Techniques for laser remote sensing of the environment, *Remote Sensing Reviews*, vol. 3, pp. 1-57.

Kogan, F.N. (1990): Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 11, pp. 1405-1419.

Konecny, G. (1986): First Results of the European Spacelab Photogrammetric Camera Mission, en *Satellite Remote Sensing for Resources Development* (K.H. Szekielda, Ed.), Graham and Trotman Ltd., London, pp. 115-121.

Koopmans, B.N. (1983): Spaceborne imaging radars, present and future, *ITC Journal*, vol. 83/3, pp. 223-231.

Kovalick, W.M. (1983): *The Effect of Selected Preprocessing Procedures upon the Accuracy of a Landsat Derived Classification of a Forested Wetland*, M.S. Thesis, Virginia Polytechnic, Blacksburg.

Kramer, H.J. (1994): *Observation of the Earth and its Environment. Survey and Missions and Sensors*, Springer-Verlag, Berlin.

Kruse, F.A., Kierein, K.S. y Boardman, J.W. (1990): Mineral mapping at cuprite, Nevada, with a 63-channel imaging spectrometer, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 56, pp. 83-92.

Kumar, R. y Silva, L.F. (1977): Separability of agricultural cover types by remote sensing in the visible and infrared wavelength regions, *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, vol. 15, pp. 49-59.

Labrandero, J.L. (1978): *Aplicación de métodos digitales al reconocimiento de suelos mediante sensores remotos*, Univ. Autónoma de Madrid. Tesis Doctoral, Madrid.

Labuto, M.R. (1991): Cloud detection using "yellowness" parameter from "tasseled cap" transformation in a Landsat-MSS image, en *Proc. V Simp. Latinoamericano de Percepción Remota*, Cuzco, pp. 220-228.

Lachowski, H.M. y Dietrich, D.L. (1978): Landsat assisted forest inventory of the Philippine Islands, en *Proc. 12th Intern. Symp. Rem. Sen. of Environment*, Ann Arbor, pp. 1401-1405.

Lachowski, H.M., Maus, P. y Platt, B. (1992): Integrating remote sensing with GIS. Procedures from the forest service, *Journal of Forestry*, vol. 90, pp. 16-21.

Lam, N.S. (1990): Description and measurement of Landsat-TM images using fractals, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 56, pp. 187-195.

Lauer, D.T., Estes, J.E., Jensen, J.R. y Greenlee, D.D. (1991): Institutional issues affecting the integration and use of remotely sensed data and geographic information systems, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 57, pp. 647-654.

Leckie, D.G. (1990): Synergism of synthetic aperture radar and visible/infrared data for forest type discrimination, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 56, pp. 1237-1246.

Li, H. y Reinolds, J.F. (1993): A new contagion index to quantify spatial patterns of landscapes, *Landscape Ecology*, vol. 8, pp. 155-162.

Lillesand, T.M. y Kiefer, R.W. (1994): *Remote Sensing and Image Interpretation*, John Wiley and Sons (3rd Ed.), New York.

Link, L.E. y Struve, H. (1978): Problems and concepts in remote sensing of land use, en *Proc. 12 th. Inter. Symp. on Remote Sensing of Environment*, Ann Arbor, pp. 1073-1079.

Links, H.F. (1976): Land-use mapping from Skylab S190B photography, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 42, pp. 301-307.

Lira, J. (1987): *La percepción remota: nuestros ojos desde el espacio*, México, Fondo de Cultura Económica.

Llop, R., González, F., Cuevas, J.M. y López, S. (1987): Utilización de los datos SIR-A para el reconocimiento de los usos del suelo en la región centro española, en *I Reunión Científica del Grupo de Trabajo en Teledetección*, Barcelona, pp. 115-137.

Lloyd, D. (1989): A phenological description of Iberian vegetation using short wave vegetation index imagery, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 10, pp. 827-833.

Lo, C.P. (1986): *Applied Remote Sensing*, Logman Scientific and Technical, New York.

Lo, C.P. y Welch, R. (1977): Chinese urban population estimates, *Annals Association of American Geographers*, vol. 47, pp. 246-253.

Lo, T.H.C., Scarpace, F.L. y Lillesand, T.M. (1986): Use of multitemporal spectral profiles in agricultural land-cover classification, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 52, pp. 535-544.

López, M.J. (1990): *La Temperatura superficial del mar en la cuenca balear y Golfo de Valencia a partir de imágenes NOAA*, Tesis Doctoral, Universidad de Valencia.

López, M.J. y Caselles, V. (1989): A multitemporal study of chlorophyll-A concentration in the Albufera lagoon of Valencia, Spain, using Thematic Mapper data, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 11, pp. 301-311.

López, S., González, F., Llop, R. y Cuevas, J.M. (1991): An evaluation of the utility of NOAA AVHRR images for monitoring forest fire risk in Spain, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 12, pp. 1841-1851.

López-Vizoso, J.M. (1987): Cartografía automática de la ocupación del suelo en la comarca ferrolana, *Estudios Territoriales*, vol. 25, pp. 65-77.

López-Vizoso, J.M. (1989): La observación de la Tierra desde el espacio: el mapa de ocupación del suelo de la Comunidad Económica Europea, *Estudios Geográficos*, vol. 50, pp. 409-434.

Lucas, R.M., Honzak, M., Foody, G.M., Curran, P.J. y Corves, C. (1993): Characterizing tropical secondary forests using multi-temporal Landsat sensor imagery, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 14, pp. 3016-3067.

Lulla, K. (1985): Some observations on geobotanical remote sensing and mineral prospecting, *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 11, pp. 17-38.

Lulla, K. (1993): Space shuttle Earth observations database for global urban applications, en *Cities of the World as Seen from Space*, (K.N. Au, Ed.), Geocarto International, Hong-Kong, pp. 15-19.

Lusch, D.P. (1989): Fundamental considerations for teaching the spectral reflectance characteristics of vegetation, soil and water, en *Current Trends in Remote Sensing Education* (M.D. Nellis, R. Lougeay y K. Lulla, Eds.), Geocarto International Centre, Hong Kong, pp. 5-2.

Maguire, D.J., Goodchild, M.F. y Rhind, D.W. Eds. (1991): *Geographical Information Systems. Principles and Applications*, Longman, London.

Malingreau, J.P. (1991): Remote sensing for tropical forest monitoring: an overview, en *Remote Sensing and Geographical Information Systems for Resource Management in Developing Countries* (A.S.Belward, y C.R.Valenzuela, Eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 253-278.

Malingreau, J.P. y Tucker, C.J. (1987): The contribution of AVHRR data for measuring and understanding global processes: Large-scale deforestacion in the Amazon basin, en *Proc. IGARS'87*, Ann Arbor, pp. 443-448.

Markham, G.L. y Townshend, J.R.G. (1981): Land cover classification accuracy as a function of sensor spatial resolution, en *Proc. 15th Intern. Symp. Rem. Sens. of Environment*, Ann Arbor, pp. 1075-1090.

Marsh, S.E., Switzer, P., Kowalick, W.S. y Lyon, R.J.P. (1980): Resolving the percentage of component terrain within single resolution elements, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 46, pp. 1079-1086.

Martin, F.C. (1985): Using a Geographic Information System for forest land mapping and management, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 51, pp. 1753-1759.

Martin, L.R.G. (1989): Accuracy assessment of Landsat-based visual change detection methods applied to the rural-urban fringe, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 55, pp. 209-215.

Martin, L.R.G. y Howarth, P.J. (1989): Change-detection accuracy assessment using SPOT multispectral imagery of the rural-urban fringe, *Remote Sensing of Environment*, vol. 30, pp. 55-66.

Martín, M.P., Viedma, O. y Domínguez, L. (1992): La enseñanza de la teledetección en España: inventario de cursos, medios y programas docentes, *Serie Geográfica*, vol. 2, pp. 11-21.

Martín, M.P., Viedma, O. y Chuvieco, E. (1994a): High versus low resolution satellite images to estimate burned areas in large forest fires, en *Proc. 2nd Intern. Conf. on forest fire research*, Coimbra, vol. 2, pp. 653-666.

Martín, M.P., Chuvieco, E. y Domínguez, L. (1994b): Cartografía, evaluación y seguimiento de grandes incendios forestales, *Revista Española de Teledetección*, vol. 3, pp. 20-27.

Martín, M.P., Domínguez, L. y Chuvieco, E. (1995): Estimating forest fire danger from AVHRR data, en *Sensors and Environmental Applications of Remote Sensing* (J. Askne, Ed.), A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 371-376.

Martín, M.P. y Chuvieco, E. (1995): Cartografía y evaluación superficial de grandes incendios forestales a partir de imágenes de satélite, *Ecología*, vol. 9, pp. 9-21.

Martínez-Vega, J. (1989): Propuesta metodológica para la presentación cartográfica de los tipos dinámicos de ocupación y uso del suelo, *Estudios Geográficos*, vol. 39, pp. 235-258.

Martínez-Vega, J. (1996): Una revisión sobre las imágenes espaciales como fuentes cartográficas, *Revista Española de Teledetección*, vol. 6, pp. 37-50.

Marx, C. y Hildebrandt, G. (1978): Qualitative and quantitative interpretation of Landsat MSS data to forest cover mapping in Germany, en *Proceedings on the International Symposium on Remote Sensing for Observation and Inventory of Earth Resources and the Endangered Environment*, Freiburg, pp. 1791-1804.

Maselli, F., Conese, C., De Filippis, T. y Norcini, S. (1995): Estimation of forest parameters through fuzzy classification of TM data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, pp. 77-84.

Mather, P.M. (1987): *Computer Processing of Remotely Sensed Images*, John Wiley and Sons, Chichester.

Matson, M. y Holben, B. (1987): Satellite detection of tropical burning in Brazil, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 8, pp. 509-516.

Measures, R.M. (1984): *Laser Remote Sensing*, John Wiley, New York.

Meijerink, A.H.J. y Donker, N.H.W. (1978): The ITC approach to digital processing applied to land use mapping in the Himalayas and Central Java, en *Remote Sensing Applications in Developing Countries* (Collins, L. y Van Genderen, J.L. Eds.), Reading, pp. 75-83.

Meliá, J. (1986): *Signaturas Espectrales e Indices de Vegetación*, Facultad de Ciencias Físicas U. Valencia, Burjassot.

Meliá, J., Gandia, S. y Caselles, V. (1986): Teledetección y signaturas espectrales, *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol. 80, pp. 177-185.

Meliá, J. y Sobrino, J.A. (1987): A study on the utilization of SIR-A data for population estimation in the Eastern part of Spain, *Geocarto International*, vol. 2, pp. 33-38.

Mergerson, J.W. (1981): Crop area estimates using ground gathered and Landsat data: A multitemporal approach, en *Proc. 15th Intern. Symp. Rem. Sens. of Environment*, Ann Arbor, pp. 1211-1218.

Merideth, R.W. y Sacks, A.B. (1986): Education in environmental remote sensing: a bibliography and characterization of doctoral dissertations, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 52, pp. 349-365.

Middelkoop, H. y Janssen, L.L. (1991): Implementation of temporal relationships in knowledge based classification of satellite images, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 57, pp. 937-945.

Miller, L.D. y Williams, D.L. (1978): Monitoring forest canopy alteration around the world with digital analysis of Landsat imagery, en *Proceedings on the International Symposium on Remote Sensing for Observation and Inventory of Earth Resources and the Endangered Environment*, Freiburg, pp. 1721-1763.

Miller, L.D., Nualchawee, K. y Tom, C. (1978): Analysis of the dynamics of shifting cultivation in the tropical forest of Northern Thailand using landscape modeling and classification of Landsat imagery, en *Proc. 12th Int. Symposium on Remote Sensing of Environment*, Ann Arbor, pp. 1167-1174.

Millington, A.C., Wellens, J., Settle, J.J. y Saull, R.J. (1994): Explaining and monitoring land-cover dynamics in drylands using multi-temporal analysis of NOAA-AVHRR imagery, en *Environmental Remote Sensing from Regional to Global Scales* (Foody, G.M. y Curran, P.J. Eds.), John Wiley & Sons, Chichester, pp. 16-43.

Milton, N.M., Collins, W., Chang, S.H. y Schmidt, R.G. (1983): Remote detection of metal anomalies on Pilot Mountain, Randolph County, North Carolina, *Economic Geology*, vol. 78, pp. 605-617.

Milton, E.J., Rollin, E.M. y Emery, D.R. (1995): Advances in field spectroscopy, en *Advances in Environmental Remote Sensing* (F.M. Danson y S.E. Plummer, Eds.), John Wiley, Chichester, pp. 9-32.

Molina, G.Z. y Chuvieco, E. (1995): Detección del crecimiento urbano en la ciudad de Maracaibo (Venezuela) mediante análisis multitemporal de imágenes MSS y TM", *VI Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección*, Valladolid (en prensa).

Moller-Jensen, L. (1990): Knowledge-based classification of an urban area using texture and context information in Landsat TM imagery, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 56, pp. 899-904.

Moore, G.K. y Waltz, F.A. (1983): Objective procedures for lineament enhancement and extraction. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 49, pp. 641-647.

Moran, P. (1948): The interpretation of statistical maps, *Journal of the Royal Statistical Society*, vol. 108, pp. 243-251.

Morain, S.A. y Klankamsorn, B. (1978): Forest mapping and inventory techniques through visual analysis of Landsat imagery: examples from Thailand. en *Proc. 12th International Symposium on Remote Sensing of Environment*. Ann Arbor, pp. 417-426.

Moreira, J.M. y Ojeda, J. (1992): *Andalucía, una visión inédita desde el espacio*. Agencia de Medio Ambiente. Junta de Andalucía, Sevilla.

Moreira, J.M. y Fernández, A. (1995): *Usos y coberturas vegetales del suelo en Andalucía seguimiento a través de imágenes de satélite*, Sevilla. Junta de Andalucía. C. Medio Ambiente.

Mouat, D.A., Mattin, G.G. y Lancaster, J. (1993): Remote sensing techniques in the analysis of change detection, *Geocarto International*, vol. 8, pp. 39-50.

Mounsey, H.M. (1991): Multisource, multinational environmental G.I.S.: lessons learnt from CORINE. en *Geographical Information Systems* (D. Maguire, M.F. Goodchild, y D.W. Rhind. Eds.), Longman, London, pp. vol. 2: 185-200.

Muchoki, C.H.K. (1988): Remotely sensed relationships between wooded patch habitats and agricultural landscape type: A basis for ecological planning, en *Landscape Ecology and Management* (M.R. Moss, Ed.), Polyscience Publications, Montreal, pp. 85-95.

Mulders, M.A. (1987): *Remote Sensing in Soil Science*. Elsevier. Amsterdam.

Muller, J.P. (1988): Computing issues in digital image processing in remote sensing. en *Digital Image Processing in Remote Sensing* (J.P. Muller, Ed.), Taylor and Francis, London, pp. 1-20.

Murphy, D.L. (1985): Estimating neighborhood variability with a binary comparison matrix. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 51, pp. 667-674.

Murtha, P.A. (1978): Remote sensing and vegetation damage: a theory for detection and assessment, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 44, pp. 1147-1158.

Mussakowski, R.S. (1985): Revising agricultural land use maps by digital change detection on Landsat data. en *ASPRS 51st Annual Meeting, Tech. Papers*, Washington, pp. 312-319.

NASA (1976): *Mission to Earth: Landsat views of the world*. Greenbelt, Goddard Space Flight Center.

NASA (1977): *Skylab Explores the Earth*. Washington. NASA SP380.

National Audubon Society (1995): *Earth from space*. Alfred A. Knopf Inc. New York.

Nelson, R. y Grebowsky, G. (1982): Evaluation of temporal registration of Landsat scenes, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 3, pp. 45-50.

Nelson, R., Horning, N. y Stone, T. (1987): Determining the rate of forest conversion in Mato Grosso, Brazil, using Landsat MSS and AVHRR data, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 8, pp. 1767-1784.

Nelson, R., Krabill, W. y Tonelli, J. (1988): Estimating forest biomass and volume using airborne laser data, *Remote Sensing of Environment*, vol. 24, pp. 247-267.

Nicholson, S.E. (1989): Remote sensing of land surface parameters of relevance to climate studies, *Progress in Physical Geography*, vol. 13, pp. 1-12.

Nikolaus, S. (1988): Visual and digital classification of Landsat TM data for soil, physiography and land use mapping in Axios alluvial plain, Thessaloniki, Greece, *Geocarto International*, vol. 4, pp. 55-66.

Novak, K. (1992): Rectification of digital imagery, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 58, pp. 339-344.

Núñez, R. Ed. (1976): *Thematic Mapping, Land Use, Geological Structure and Water Resources in Central Spain* (R. Núñez de las Cuevas, Ed.), NASA Project 28760.

Núñez, R., Chuvieco, E., Sancho, J., Palou, F. y Casas, J.M. (1983): Mapa de usos del suelo de la región central. Estudio piloto sobre la aplicación del tratamiento digital de imágenes Landsat a la confección de mapas de usos del suelo, *Geographica*, vol. 25, pp. 61-78.

Olorunfemi, J.F. (1987): Identification and measurement of the areal extent settlements from Landsat, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 8, pp. 1839-1843.

O'Neill, R.V., Krummel, J.R., Gardner, R.H., Sugihara, G. y Jackson, B. (1988): Indices of landscape pattern, *Landscape Ecology*, vol. 1, pp. 153-162.

Ortí, F., García, A. y Martín, M.A. (1979): Geometric correction of MSS Landsat images using a ground control point library, en *Remote Sensing and National Mapping* (J. Allan y R. Harris, Eds.), Remote Sensing Society, London, pp. 17-26.

O.T.A. (1984): *Remote Sensing and the Private Sector: Issues for Discussion. A Technical Memorandum*, U.S. Congress, Office of Technology Assessment, OTA-TM-ISC-20, Washington, D.C.

O.T.A. (1993): *The Future of Remote Sensing from Space: Civilian Satellite Systems and Applications*, Washington, D.C., U.S. Government Printing Office.

Owe, M. y Ormsby, J. (1984): Improved classification of small scale urban watersheds using Thematic Mapper simulator data, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 5, pp. 761-767.

Palà, V. y Pons, X. (1995): Incorporation of relief in polynomial-based geometric corrections, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 61, pp. 935-944.

Paltridge, G.W. y Barber, J. (1988): Monitoring grassland dryness and fire potential in Australia with NOAA/AVHRR data, *Remote Sensing of Environment*, vol. 25, pp. 381-394.

Parry, D.E. y Trevett, J.W. (1979): Mapping Nigeria's vegetation from radar, *Geographical Journal*, vol. 145, pp. 265-281.

Pastor, J. y Broshart, M. (1990): The spatial pattern of a Northern conifer-hardwood landscape, *Landscape Ecology*, vol. 4, pp. 55-68.

PCI (1994): *Using PCI Software*, Richmond Hill, Ontario.

Pearson, S.M. (1994): Ecological perspective: understanding the impacts of forest fragmentation, en *Remote Sensing and GIS in Ecosystem Management* (V.A. Sample, Ed.), Island Press, Washington, D.C., pp. 178-191.

Pellemans, A.H., Jordans, R.W. y Allewijn, R. (1993): Merging multispectral and pancromatic SPOT images with respect to the radiometric properties of the sensor, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 59, pp. 81-87.

Perry, C.R. y Lautenschlager, L.F. (1984): Functional equivalence of spectral vegetation indices, *Remote Sensing of Environment*, vol. 14, pp. 169-182.

Peters, A., Rundquist, D.C. y Wilhite, P.A. (1991): Satellite detection of the geographic core of the 1988 Nebraska drought, *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 57, pp. 35-47.

Philipson, W.R. y Teng, W.L. (1988): Operational interpretation of AVHRR vegetation indices for World crop information, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 54, pp. 55-59.

Pickup, G. y Foran, B.D. (1987): The use of spectral and spatial variability to monitor cover change on inert landscapes, *Remote Sensing of Environment*, vol. 23, pp. 351-363.

Pierce, L.L. y Congalton, R.G. (1988): A methodology for mapping forest latent heat flux densities using remote sensing, *Remote Sensing of Environment*, vol. 24, pp. 405-418.

Pilon, P., Howarth, P.J., Bullock, R.A. y Adeniyi, P.O. (1988): An enhanced classification approach to change detection in semi-arid environments, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 54, pp. 1709-1716.

Pinilla, C. (1995): *Elementos de Teledetección*, RAMA, Madrid.

Podwysocki, M.H., Power, M.S. y Jones, O.D. (1985): Preliminary evaluation of the Landsat-4 Thematic Mapper data for mineral exploration, en *The Earth's Surface Studied from Space, Advances in Space Research* (S.G. Ungar, Ed.), Pergamon Press, Oxford, pp. 13-20.

Pons, X. y Solé-Sugrañes, L. (1994): A simple radiometric correction model to improve automatic mapping of vegetation from multispectral satellite data, *Remote Sensing of Environment*, vol. 48, pp. 191-204.

Price, J.C. (1987): Calibration of satellite radiometers and the comparison of vegetation indices, *Remote Sensing of Environment*, vol. 21, pp. 15-27.

Privette, J.L., Fowler, C., Wick, G.A., Baldwin, D. y Emery, W.J. (1995): Effects of orbital drift on Advanced Very High Resolution Radiometer products: Normalized Difference Vegetation Index and Sea Surface Temperature, *Remote Sensing of Environment*, vol. 53, pp. 164-171.

Prosper-Laget, V., Douguédroit, A. y Guinot, J.P. (1994): Mapping the risk of forest fire departure using NOAA satellite information, en *Proc. International Workshop on Satellite technology and GIS for Mediterranean forest mapping and fire management*, Thessaloniki, pp. 151-163.

Quarmby, N.A., Townshend, J.R.G., Settle, J.J., White, K.H., Milnes, M., Hindle, T.L. y Silleos, N. (1992): Linear mixture modelling applied to AVHRR data for crop area estimation, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 11, pp. 415-425.

Quegan, S. (1995): Recent advances in understanding SAR imagery, en *Advances in Environment Remote Sensing* (F.M. Danson y S.E. Plummer, Eds.), John Wiley & Sons, Chichester, pp. 89-104.

Rebollo, M. y Orti, F. (1980): *Pattern Recognition Techniques: Remote Sensing Applications at Centro de Investigación UAM-IBM*, Centro de Investigación UAM-IBM, Madrid.

Reinhardt, E.D. y Ringleb, R.V. (1990): Analysis of changes in patterns of a forested landscape following wildfire using Landsat data and landscape ecology methodology, en *Proc. Resource Technology 90*, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Washington, D.C., pp. 83-93.

Renz, A.N. (1985): Multitemporal analysis of Landsat imagery for monitoring forest cutovers in Nova Scotia, *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 11, pp. 189-194.

Rhind, D. y Clark, P. (1988): Cartographic data inputs to global databases, en *Building Databases for Global Science*, (H. Mounsey, Ed.), Taylor and Francis, London, pp. 79-104.

Richards, J.A. (1993): *Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction* (2nd Ed.), Springer-Verlag, Berlin.

Richter, R. (1990): A fast atmospheric correction algorithm applied to Landsat-TM images, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 11, pp. 159-166.

Riitters, K.H., O'Neill, R.V., Hunsaker, C.T., Wickham, J.D., Yankee, D.H. y Timmins, S.P. (1995): A factor analysis of landscape pattern and structure metrics, *Landscape Ecology*, vol. 10, pp. 23-39.

Ripple, W.J., Bradshaw, G.A. y Spies, T.A. (1991): Measuring forest landscape patterns in the cascade range of Oregon, *Biological Conservation*, vol. 57, pp. 73-88.

Robinove, C. (1979): *Integrated Terrain Mapping with Digital Landsat Images in Queensland, Australia*, Geological Survey Prof. Paper 1102, Washington.

Robinove, C. (1981): The logic of multispectral classification and mapping the land, *Remote Sensing of Environment*, vol. 11, pp. 231-244.

Robinson, I.S. (1985): *Satellite Oceanography. An Introduction for Oceanographers and Remote Sensing Scientist*, John Wiley, Chichester.

Rock, B.N., Vogelmann, J.E., Williams, D.L., Vogelmann, A.F. y Hoshizaki, T. (1986): Remote detection of forest damage, *Bioscience*, vol. 36, pp. 439-445.

Rosborough, G.W., Baldwin, D. y Emery, W.J. (1994): Precise AVHRR image navigation, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 32, pp. 644-657.

Rosch, W.L. (1994): *Hardware Bible*, SAMS Publishing, Indianapolis.

Rosenfeld, G.H. (1982): Sample design for estimating change in land use and land cover, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 48, pp. 793-801.

Ruiz, G. Ed. (1992): *Imagen de Venezuela. Una visión espacial*, Petróleos de Venezuela, Caracas.

Rumelhart, D.E., Hinton, G.E. y Williams, R.J. (1986): Learning representations by back-propagating errors, *Nature*, vol. 323, pp. 533-535.

Running, S.W., Nemani, R.R., Peterson, D.L., Band, L.E., Potts, D.F., Pierce, L.L. y Spanner, M.A. (1989): Mapping regional forest evapotranspiration and photosynthesis by coupling satellite data with ecosystem simulation, *Ecology*, vol. 70, pp. 1090-1101.

Sabins, F.F. (1987): *Remote Sensing. Principles and Interpretation*, W.H. Freeman and Co. (2nd Ed.), New York.

Sadar, S.A., Linden, D.S. y McGuire, M. (1982): Fuels mapping from Landsat imagery and digital terrain data for fire suppression decisions, en *Proc. ACSM-ASP Congress*, Fort Lauderdale, pp. 345-351.

Sader, S.A. y Winne, J.C. (1992): RGB-NDVI colour composites for visualizing forest change dynamics, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 13, pp. 3055-3067.

Sagdejew, R.S. (1982): *Atlas Zur Interpretation Aerokosmischer Multispektralaufnahmen*, Akademie Verlag y Mosku Verlag Nauka, Berlin.

S.A.I. (Space Applications Institute) (1995): Market analysis for the CEO Programme. Executive Summary, Ispra (documento disponible en el servidor de Internet del CEO).

Salas, F.J. y Chuvieco, E. (1994): "Sistemas de Información Geográfica y Teledetección en la prevención de incendios forestales: un ensayo en el Macizo Oriental de la Sierra de Gredos", *Estudios Geográficos*, vol. 40, pp. 683-710.

Salas, F.J. y Chuvieco, E. (1995): Aplicación de imágenes Landsat-TM a la cartografía de modelos combustibles, *Revista de Teledetección*, vol. 5, pp. 18-28.

Sampson, S.A. (1993): Two indices to characterize temporal patterns in the spectral response to vegetation, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 59, pp. 511-517.

Sancho, J. (1992): Imagen y Paisaje. Atlas Nacional de España. Sección I, Grupo 3c, Instituto Geográfico Nacional, Madrid.

Sancho, J. y Chuvieco, E. (1986): *Castellón desde el Espacio*, Caja de Ahorros de Castellón de la Plana, Castellón.

Sancho, J. y Chuvieco, E. (1992): *Iberoamérica desde el espacio*, Sociedad Estatal Quinto Centenario, Lunwerg, CNIG, Madrid.

Schneider, S. (1980): Interpretation of satellite imagery for determination of land use data, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 1, pp. 85-90.

Schowengerdt, R.A. (1983): *Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing*, Academic Press, New York.

Schowengerdt, R.A. y Wang, H.L. (1989): A general purpose expert system for image processing, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 55, pp. 1277-1284.

Schreier, H., Goodfellow, L.C. y Lavkulich, L.M. (1982): The use of digital multi-date Landsat imagery in terrain classification, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 48, pp. 111-119.

Schriever, J.R. y Congalton, R.G. (1995): Evaluating seasonal variability as an aid to cover-type mapping from Landsat Thematic Mapper data in the Northeast, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 61, pp. 321-327.

Schroeder, M. (1986): Spacelab Metric Camera Experiments, en *Satellite Remote Sensing for Resources Development* (K.H. Szekielda, Ed.), Graham and Trotman Ltd, London, pp. 81-92.

Seguin, B., Assad, E., Freteaud, J.P., Imberhon, J., Kerr, Y. y Lagouarde, J.P. (1989): Use of meteorological satellites for water balance monitoring in Sahelian regions, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 10, pp. 1101-1117.

Sellers, P.J. (1985): Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 6, pp. 1335-1372.

Sellers, P.J. (1987): Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration II. The role of biophysics in the linearity of their interdependence, *Remote Sensing of Environment*, vol. 21, pp. 143-183.

Sellers, P.J. (1989): Vegetation-Canopy spectral reflectance and biophysical processes, en *Theory and Applications of Optical Remote Sensing* (G. Asrar, Ed.), Wiley, New York, pp. 297-335.

Sellman, A.N. (1977): *Computer Analysis on Classification of Landsat Data for Land Cover of Selected Test Sites in the Dominican Republic*, Draft Report to the Econ.Research Service, U.S.A.I.D., .

Settle, J.J. y Drake, N.A. (1993): Linear mixing and the estimation of ground cover proportions, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 14, pp. 1159-1177.

Sheffield, C. (1981): *Earth Watch. A Survey of the World from Space*, Sidgwick and Jackson Ltd., London.

Sheffield, C. (1983): *Man on Earth. The Marks of Man. A Survey from Space*, Sidgwick and Jackson Ltd., London.

Sheffield, C. (1985): Selecting band combinations from multispectral data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 51, pp. 681-687.

Shimabukuro, Y.E. y Smith, J.A. (1991): The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 29, pp. 16-20.

Shimabukuro, Y.E., Holben, B.N. y Tucker, C.J. (1994): Fraction images derived from NOAA-AVHRR data for studying the deforestation in the Brazilian Amazon, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 15, pp. 517-520.

Short, N.M. (1982): *The Landsat Tutorial Workbook: Basics of Satellite Remote Sensing*, NASA Scientific and Technical Information Branch, Washington, D.C.

Short, N.M. y Blair, R.W. Eds. (1986): *Geomorphology from Space*, NASA, Scientific and Technical Information Branch, Washington, D.C.

Sicco, G. (1980): Use of Landsat imagery for forest management, *ITC Journal*, vol. 3, pp. 563-575.

Siljeström, P. y Moreno, A. (1995): Monitoring burnt areas by principal component analysis of multi-temporal TM data, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 16, pp. 1577-1587.

Singh, A. (1986): Change detection in the tropical forest environment of Northeastern India using Landsat, en *Remote Sensing and Tropical Land Management* (M.J. Eden y J.T. Parry, Eds.), John Wiley, Chichester, pp. 237-254.

Skidmore, A.K. (1989): An expert system classifies eucalyptus forest types using Thematic Mapper data and digital terrain model, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 55, pp. 1149-1464.

Slater, P.N. (1980): *Remote Sensing, Optics and Optical Systems*, Addison-Wesley Pub. Co., Reading, MA.

Smith, R.M. (1984): *Images of the World. An Atlas of Satellite Imagery and Maps*, Collins-Longman, Essex.

Smith, J.L. y Kovalick, B. (1985): A comparison of the effects of resampling before and after classification on the accuracy of a Landsat derived cover type map, *Advances Techniques for Monitoring Global Environmental Data*, London, pp. 391-399.

Snedecor, G.W. y Cochran, W.G. (1980): *Statistical Methods, 7th Edition*, The Iowa University Press, Ames.

Star, J.L., y Estes, J.E (1990): *Geographic Information Systems*, Prentice Hall, Englewood Cliffs.

Star, J.L., Estes, J.E. y Davis, F. (1991): Improved integration of remote sensing and Geographic Information Systems: a background to NCGIA initiative 12, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 57, pp. 643-645.

Stehman, S.V. (1992): Comparison of systematic and random sampling for estimating the accuracy of maps generated from remotely sensed data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 58, pp. 1343-1350.

Steven, M.D. y Jaggard, K.W. (1995): Advances in crop monitoring by remote sensing, en *Advances in Environmental Remote Sensing* (F.M. Danson y S.E.Plummer, Eds.), John Wiley & Sons, Chichester, pp. 143-156.

Story, M.H. y Campbell, J.B. (1986): The effect of training data on classification accuracy, *ACSM-ASPRS Convention. Technical Papers*, vol. 4, pp. 370-379.

Story, M. y Congalton, R.G. (1986): Accuracy assessment: A users perspective, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 52, pp. 397-399.

Strahler, A.H. (1980): The use of prior probabilities in maximum likelihood classification of remotely sensed data, *Remote Sensing of Environment*, vol. 10, pp. 135-163.

Strahler, A.H. (1984): Timber inventory using Landsat, en *8th Canadian Symposium on Remote Sensing*, Quebec, pp. 665-674.

Strahler, A.H. y Logan, T.L. (1978): Improving forest cover classification accuracy from Landsat by incorporating topographic information, en *Proc. 12th Intern. Symp. Rem. Sens. and Environment*, Ann Arbor, pp. 927-942.

Strahler, A.H., Woodcock, C.E. y Smith, J.A. (1986): On the nature of models in remote sensing, *Remote Sensing of Environment*, vol. 20, pp. 121-140.

Strain, P. y Engle, F. (1993): *Looking at Earth*, Turner Publishing Inc., Atlanta.

Swain, P.H. y Davis, S.M. Eds. (1978): *Remote Sensing: The Quantitative Approach*, McGraw-Hill, New York.

Szekielda, K.H. (1988): *Satellite Monitoring of the Earth*, John Wiley and Sons, New York.

Tameishi, H. (1991): Fisheries detection using NOAA satellite, en *Applications of Remote Sensing in Asia and Oceania*, (S. Murai, Ed.), Asian Association on Remote Sensing, Hong Kong, pp. 323-332.

Tanaka, S., Kimura, H. y Suga, Y. (1983): Preparation of a 1:25.000 Landsat map for assessment of burnt area on Etajima Island, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 4, pp. 17-31.

Tanré, D., Devoo, C., Buhaut, P., Herman, M., Morcrette, J.T., Perbos, J. Y Deschamps, P.Y. (1986): *Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum (5S)*, Laboratoire d'Optique atmosferique Université des Sciences et Techniques de Lille.

Tapia, L. (1989): Derecho espacial y programas de observación de la Tierra, en *La Observación de la Tierra desde el Espacio* (R. Núñez, Ed.). Univ. Menéndez Pelayo, Santander, pp. 1-15.

Tarpley, J.D., Schneider, S.R. y Money, R.L. (1984): Global vegetation indices from the NOAA-7 meteorological satellites, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, vol. 23, pp. 491-494.

Taylor, B.F., Dini, P.W. y Kidson, J.W.D. (1985): Determination of seasonal and inter-annual variation in New Zealand pasture growth from NOAA-7 data, *Remote Sensing of Environment*, vol. 18, pp. 177-192.

Teng, W.L. (1990): AVHRR monitoring of U.S. crops during the 1988 drought, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 56, pp. 1143-1146.

Terhalle, U. y Bodechtel, J. (1986): Landsat TM data enhancement technique for mapping arid geomorphic features, en *Mapping from Modern Imagery*, Remote Sensing Society, Edinburgh, pp. 725-729.

Thomas, I.L. (1980): Spatial post-processing of spectrally-classified Landsat data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 46, pp. 1201-1206.

Thomas, I.L., Benning, V.M. y Ching, N.P. (1987a): *Classification of Remotely Sensed Images*, Adam Hilger, Bristol.

Thomas, I.L., Ching, N.P., Benning, V.M. y D'Aguanno, J.A. (1987b): A review of multi-channel indices of class separability. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 8, pp. 331-350.

Tindal, M.A. (1978): *Educator's Guide for Mission to Earth: Landsat Views the World*, NASA, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland.

Todd, W.J., Gehring, D.G. y Haman, J.F. (1980): Landsat wildland mapping accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 46, pp. 509-520.

Togliatti, G. (1986): LFC: The second generation photogrammetric camera for space photography. *Abstracts ESA/EaRSEL Symposium on Europe from Space*, SP 258.

Toll, D.L. (1984): An evaluation of simulated Thematic Mapper data and Landsat MSS data for discriminating suburban and regional land use and land cover. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 50, pp. 1713-1724.

Tomlin, D. (1990): *Geographic Information Systems and Cartographic Modeling*, Prentice Hall, Englewood Cliffs.

Torres, R. (1994): Estrategias de investigación de la Agencia Espacial Europea. Primeros resultados del satélite ERS-1, en *Jornadas Técnicas sobre SIG y Teledetección espacial aplicados a la ordenación del territorio y el medio ambiente*, Centro de Estudios Ambientales, Vitoria, pp. 127-133.

Toutin, T. y Beaudoin, M. (1995): Real-time extraction of planimetric and altimetric features from digital stereo SPOT data using a digital video plotter, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 61, pp. 63-68.

Townshend, J.R.G. (1980): *The spatial resolving power of Earth resources satellites: a review*, NASA Tech. Memorandum 82020. Goddard Space Flight Center, Maryland.

Townshend, J.R.G. Ed. (1981): *Terrain Analysis and Remote Sensing*, George Allen and Unwin Ltd, London.

Townshend, J. y Justice, C. (1981): Information extraction from remotely sensed data. A user view. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 2, pp. 313-329.

Townshend, J.R.G., Justice, C.O. y Kalb, V. (1987): Characterization and classification of South American land cover types using satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 8, pp. 1189-1207.

Townshend, J., Justice, C., Li, W., Gurney, C. y McManus, J. (1991): Global land cover classification by remote sensing: present capabilities and future possibilities. *Remote Sensing of Environment*, vol. 35, pp. 243-255.

Townshend, J.R.G., Justice, C.O., Gurney, C. y McManus, J. (1992): The impact of misregistration on change detection. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, pp. 1054-1060.

Trevett, J.W. (1986): *Imaging Radar for Resources Surveys*, Chapman and Hall, Londres.

Tricart, J. (1981): Géomorphologie et quaternaire d'apres une image R.B.V.: La vallee du Sénégal entre Bogué et Podor (Senegal, Mauritanie), *Annales de Géographie*, vol. 90, pp. 284-310.

Trolier, L.J. y Philipson, W.R. (1986): Visual analysis of Landsat Thematic Mapper images for hydrologic land use and cover, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 52, pp. 1531-1538.

Tsuchiya, K., Arai, K. y Igarashi, T. (1987): Marine observation satellite, *Remote Sensing Reviews*, vol. 3, pp. 59-103.

Tucker, C. (1978): A comparison of satellite sensor bands for vegetation monitoring, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 44, pp. 1369-1380.

Tucker, C.J. (1979): Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sensing of Environment*, vol. 18, pp. 127-150.

Tucker, C.J. (1980): Remote sensing of leaf water content in the near infrared, *Remote Sensing of Environment*, vol. 10, pp. 23-32.

Tucker, C.J., Holben, B.N. y Goff, T.E. (1984): Intensive forest clearing in Rondonia, Brazil, as detected by satellite remote sensing, *Remote Sensing of Environment*, vol. 15, pp. 255-261.

Tucker, C.J., Townshend, J.R.G. y Goff, T.E. (1985): African land-cover classification using satellite data, *Science*, vol. 227, pp. 369-375.

Tucker, C.J., Yung, I.Y., Keeling, C.D. y Gammon, R.H. (1986): Relationship between atmospheric CO_2 variations and a satellite-derived vegetation index, *Nature*, vol. 319, pp. 195-199.

Tukey, J.W. (1977): Exploratory Data Analysis, Addison-Wesley, Reading.

Turner, M.G., O'Neill, R.V., Gardner, R.H. y Milne, B.T. (1989): Effects of changing spatial scale on the analysis of landscape pattern, *Landscape Ecology*, vol. 3, pp. 153-162.

Turner, M.G., Hargrove, W.W., Gardner, R.H. y Romme, W.H. (1994): Effects of fire on landscape heterogeneity in Yellowstone National Park, Wyoming, *Journal of Vegetation Science*, vol. 5, pp. 731-742.

Valerio, A. y Ledesma, L.L. (1981): Natural resources inventories by computer-satellite mapping techniques in Chaco state, Argentine Republic, South America, en *Proc. 15th Intern. Symp. Rem. Sens. of Environment*, Ann Arbor, pp. 1327-1338.

Valor, E. y Caselles, V. (1996): Mapping land surface emmissivity from NDVI. Application to European, African and South-American areas, *Remote Sensing of Environment*, vol. 57, pp. 167-184.

Vanderzee, D. y Singh, A. (1995): Survey of geographical information system and image processing software, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 16, pp. 383-389.

Van Genderen, J.L. (1978): Guidelines for using Landsat data for rural land use surveys in developing countries, *ITC Journal*, vol. 1, pp. 30-49.

Vargas, F.F. (1995): *Análisis de las técnicas de detección de cambios para estudiar procesos de deforestación: el caso de la reserva forestal de Ticoporo (Venezuela)*, Trabajo de Investigación, Universidad de Alcalá de Henares.

Vargas, F.F. y Chuvieco, E. (1991): Dinámica de la deforestación en regiones tropicales a partir del análisis multitemporal de imágenes SPOT, en *Teledetección y Medio Ambiente*, Junta de Andalucía, Sevilla, pp. 70-76.

Vaughan, R.A. (1994): Towards common standards for training. European education projects, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 15, pp. 3051-3058.

Verbyla, D. (1995): *Satellite Remote Sensing of Natural Resources*, Lewis Publishers, Boca Raton.

Verdin, J.P. (1985): Monitoring water quality conditions in a large western reservoir with Landsat imagery, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 51, pp. 343-353.

Verhoef, W. y Peteri, P.W. (1984): Digital mosaic of the Netherlands from Landsat MSS data in natural colour, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 5, pp. 749-751.

Vidal, A., Pinglo, F., Durand, H., Devaux-Ros, C. y Maillet, A. (1994): Evaluation of a temporal fire risk index in Mediterranean forest from NOAA thermal IR, *Remote Sensing of Environment*, vol. 49, pp. 296-303.

Viedma, O. y Chuvieco, E. (1993): Cartografía y evaluación de daños causados por incendios forestales mediante técnicas de teledetección. El ejemplo de la Hoya de Buñol (Valencia), *AITIM Boletín de Información Técnica*, vol. 167, pp. 60-66.

Viedma, O., Salas, J. y Chuvieco, E. (1993): Evaluación de daños causados por el incendio de Buñol (Valencia) con imágenes TM, en *V Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección*, Las Palmas de Gran Canaria (en prensa).

Viovy, N., Arino, O. y Belward, A.S. (1992): The best index slope extraction (BISE): a method for reducing noise in NDVI time-series, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 13, pp. 1585-1590.

Vogelman, J.E. (1990): Comparison between two vegetation indices for measuring different types of forest damage in the North-Eastern United States, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 12, pp. 2281-2297.

Voûte, C. (1994): Needs for co-operation between Eastern and Western Europe, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 15, pp. 2973-2994.

Wagner, H.L., y Suits, G.H. (1983): A low cost classification algorithm for developing countries, en *User's Guide to RIPS*, Washington, Apéndice B, pp. 1525-1529.

Wald, L. (1990): Monitoring the decrease of lake Chad from space, *Geocarto International*, vol. 3, pp. 31-36.

Walker, B.H. y Turner, S.J. (1990): Non-modeling research requirements for understanding, predicting and monitoring global change, *Global Change Report*, vol. 11, pp. 23-50.

Walsh, S.J. (1987): Comparison of NOAA-AVHRR data to meteorological drought indices, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 53, pp. 1069-1074.

Wang, F. (1990): Fuzzy supervised classification of remote sensing images, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28, pp. 194-201.

Wang, F. (1993a): A knowledge-based vision system for detecting land changes at urban fringes, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 31, pp. 136-145.

Wang, F. (1993b): Integrating GIS's and remote sensing image analysis systems by unifying knowledge representation schemes, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 29, pp. 656-664.

Wang, L. y He, D.C. (1990): A new statistical approach for texture analysis, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 56, pp. 61-66.

Wang, M. y Howarth, P.J. (1993): Modeling errors in remote sensing image classification, *Remote Sensing of Environment*, vol. 45, pp. 261-271.

Welch, R. (1980): Monitoring urban population and energy utilization from satellite data, *Remote Sensing of Environment*, vol. 9, pp. 1-9.

Welch, R. (1982): Spatial resolution requeriments for urban studies, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 3, pp. 139-146.

Welch, R. y Usery, E.L. (1984): Cartographic accuracy of Landsat-4 MSS and TM image data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE22, pp. 281-288.

Westman, W.E. y Price, C.V. (1988): Spectral changes in conifers subjected to air pollution and water stress: experimental studies, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 26, pp. 11-20.

Wheeler, D.J. y Ridd, M.K. (1985): A geographic information system for resource managers based on multi-level remote sensing data, *ASP 51st Annual Meeting. Technical Papers*, vol. 2, pp. 528-537.

Woodcock, C.E. y Strahler, A.H. (1987): The factor of scale in remote sensing, *Remote Sensing of Environment*, vol. 21, pp. 311-332.

Woodcock, C.E., Strahler, A.H. y Jupp, D.L. (1988a): The use of variograms in remote sensing: I. Scene models and simulated images, *Remote Sensing of Environment*, vol. 25, pp. 323-348.

Woodcock, C.E., Strahler, A.H. y Jupp, D.L. (1988b): The use of variograms in remote sensing: II. Real digital images, *Remote Sensing of Environment*, vol. 25, pp. 349-379.

Woldai, T. (1983): Landsat and SIR-A interpretation of the Kalpin Chol and Chong Korum mountains of China, *ITC Journal*, vol. 83/3, pp. 250-252.

Wu, S.T. (1980): An improvement in land cover classification achieved by merging microwave data with Landsat multispectral scanner data, *Photo-Interpretation*, vol. 80-4, pp. 1-18.

Yates, H.W. (1984): The role of meteorological satellites in agricultural remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, vol. 14, pp. 219-233.

Yool, S.R., Eckhardt, D.W., Estes, J.E. y Cosentino, M.J. (1985): Describing the brushfire hazard in southern California, *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 75, pp. 417-430.

APÉNDICE I: FUENTES ADICIONALES DE INFORMACIÓN

1. Centros internacionales dedicados a teledeteccion espacial

• *Australian Centre for Remote Sensing*, P.O. Box 28, Belconnen, A.C.T. 2616, Australia.

• *Canada Centre for Remote Sensing*, 588 Booth Street, CDN Ottawa, Ontario K1A 0Y7, Canadá.

• *DLR*, Forschungszentrum, Post Wessling/0BB, D-8031 Oberpfaffenhofen, Alemania.

• *Environmental Research Institute of Michigan (ERIM)*, P.O. Box 8618, Ann Arbor, Michigan, USA.

• *EROS Data Center*, National Mapping Division, Sioux Falls, SD 57198, USA.

• *European Space Agency*, 8-10 rue Mario Nikis, F-75738 Paris Cedex 15, Francia.

• *Groupement pour le Dévelopment de la Télédétection Aérospatial* (GDTA), Centre Spatiale de Toulouse, 18 Avenue Edouard Belin, F-31055 Toulouse.

• *ITC*, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, P.O. Box 6, NL-7500 AA, Enschede, Países Bajos.

• *Jet Propulsion Laboratory*, California Institute of Technology, 4800 Oak Grove Drive, Pasadena, CA91103, USA.

• *NASA Goddard Space Flight Center*, Greenbelt, MD 20771, USA.

• *National Remote Sensing Agency*, Balanagar, Hyderabad-500 037, India.

• *National Remote Sensing Center*, Space Department, Royal Aircraft Establishment, Farnborough, Hampshire GU14 6TO, Reino Unido.

• *National Space Development Agency of Japan (NASDA)*, 1401 Ohashi, Hotoyama-Machi, Hikigum, Saitama 350-03, Japón.

• *RESTEC, Remote Sensing technology Center of Japan*, Roppongi Fiorst Bldg. 2F, 1-9-9106 Tokio, Japón.

• *Space Applications Institute*, Joint Research Center, JRC-Ispra Site, 21020 Ispra, Varese, Italia.

2. Centros iberoamericanos dedicados a teledetección espacial (ver también centros docentes)

• *Agencia de Medio Ambiente, Junta de Andalucía*, Servicio de Evaluación de Recursos Naturales, Pabellón de Nueva Zelanda, Avda. Acacias, s/n, Isla de la Cartuja, 41092 Sevilla, España.

• *Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos* (CLIRSEN), Apartado 8216, Quito, Ecuador.

• *Centro de Procesamiento Digital de Imágenes* (CPDI) - *Instituto de Ingeniería*, Apartado 40200, Caracas 1040-A, Venezuela

• *División de Aplicaciones de Imágenes Satelitarias* (DAIS), calle 7 num. 1267 - 2°, La Plata, Rep. Argentina.

• *GEOCUBA*, Calle 4, num. 304, La Habana, Cuba.

• *Inisel Espacio*, Mar Egeo s/n, Polígono Industrial I, 28830 San Fernando de Henares, España.

• *Institut Cartogràfic de Catalunya*, Parc de Montjuic, 08038 Barcelona, España.

• *Instituto Geográfico Nacional*, Sección de Teledetección, General Ibañez de Ibero, s/n. 28003 Madrid, España.

• *Instituto Geográfico Agustín Codazzi*, Carrera 30 No. 48-51, Bogotá D.E., Colombia.

• *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais* (INPE), Av. Dos Astronautas 1758, São José dos Campos - SP, Estado de São Paulo, Brasil.

• *Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI)*, Av. Héroe de Nacozari Sur 2301, Aguascalientes, 20290 México.

3. Sociedades Profesionales

• *American Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, 5420 Grosvenor Lane, Suite 210, Bethesda 20814-2160, USA.

• *Asian Association on Remote Sensing*, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 7-32 Roppongi, Minatoku, Tokyo, Japón.

• *Asociación Española de Teledetección*, Pinar 25, 28008 Madrid.

• *Canadian Remote Sensing Society*, 222 Somerset Street West, Suite No. 601, Ottawa, Ontario K2P 0J1, Canada.

• *European Association of Remote Sensing Laboratories*, EARSeL Secretariat, 2 Avenue Rapp, F-75340 Paris Cedex 07, Francia.

• *Remote Sensing Society*, Department of Geography, University of Nottingham, Nottingham NG7 2RD, Reino Unido.

• *Sociedad de Especialistas Latinoamericanos en Percepción Remota* (SELPER), (sede para 1995 a 1997): *Universidad Nacional Autónoma de Méjico - Instituto de Geografía*, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, Apdo. Postal 20-850, 01000 México D.F.

4. Centros docentes

• *Carnegie Laboratory of Physics, University of Dundee*, Dundee DD1 4HN, Scotland, Reino Unido.

• *Center for Remote Sensing, Imperial College of Science and Technology, Department of Physics*, Prince Consort Road, London SW7 2AZ, Reino Unido.

• *Environmental Remote Sensing Center, University of Winsconsin-Madison*, 1225 West Dayton Street, Madison, WI 53706, USA.

• *Groupement pour le Dévelopment de la Télédétection Aérospatial* (GDTA), Centre Spatiale de Toulouse, 18 Avenue Edouard Belin, F-31055 Toulouse.

• *Instituto Geográfico Agustín Codazzi*, Carrera 30 No. 48-51, Santa Fe de Bogotá, Colombia.

• *International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences* (ITC), P.O. Box 6, NL-7500 AA, Enschede, Holanda.

• *Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais* (INPE), Av. Dos Astronautas 1758, Sao José dos Campos - SP, Estado de Sao Paulo, Brasil.

• *Laboratory for Applications of Remote Sensing (LARS), Purdue University*, West Lafayette, IN 47907, USA.

• *Remote Sensing Unit*, Department of Geography, University of Nottingham. University Park, Nottingham NG7 2RD, England, Reino Unido.

• *Universidad de Alcalá de Henares, Departamento de Geografía*. Calle Colegios, 2. 28801 Alcalá de Henares, España.

• *Universidad Nacional Autónoma de Méjico - Instituto de Geografía*, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, Apdo. Postal 20-850, 01000 México D.F.

• *Universidad de Valencia, Departamento de Termodinámica. Facultad de CC. Físicas*, Doctor Moliner 50, 46100 Burjassot, Valencia, España.

5. Revistas especializadas en teledetección

• *Canadian Journal of Remote Sensing*, Canadian Remote Sensing Society, 222 Somerset Street West, Suite No. 601, Ottawa, Ontario K2P 0J1, Canada.

• *Geocarto International*, Geocarto International Centre, GPO Box 4122, Hong Kong.

• *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, IEEE Geoscience and Remote Sensing Society, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 345 E. 47th Street, New York, NY, 10017 USA.

• *International Journal of Remote Sensing*, Taylor and Francis Ltd., Rankine Road, Basingstoke, Hampshire RG24 0PR, Reino Unido.

• *ITC Journal*, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, P.O. Box 6, NL-7500 AA, Enschede, Países Bajos.

• *Photogrammetria*, Elsevier Scientific Publishing Company, Box 211, NL-1000 AE Amsterdam, Holanda.

• *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, American Society for

Photogrammetry and Remote Sensing, 5420 Grosvenor Lane, Suite 210, Bethesda 20814-2160, USA.

• *Photointerprétation*. Editions Technip. 27 rue Ginoux, F-75737, Paris Cedex 15, Francia.

• *Remote Sensing of Environment*. Elsevier Science Publishing Company Inc., 52 Vanderbilt Avenue, New York, NY 10017, USA.

• *Remote Sensing Quarterly*. University of Nebraska at Omaha, Omaha, Nebraska 68182, USA.

• *Remote Sensing Reviews*. Harwood Academic Publishers, 50 W. 23rd Street, New York, NY 10010, USA.

• *Revista Española de Teledetección*. Pinar 25, 28006 Madrid, España.

• *Soviet Journal of Remote Sensing*. Harwood Academic Publishers, 50 W. 23rd Street, New York, NY 10010, USA.

6. Recopilaciones bibliográficas

• *Earth Resources: A Continuing Bibliography with Indexes*. NASA, U.S. National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C., 20546, USA.

• *Geographical Abstracts, G: Remote Sensing, Photogrammetry and Cartography*. Geo Abstracts Ltd., Regency House, 34 Duke Street, Norwich NR3 3AP, Reino Unido.

• GEOBASE. Geo Abstracts Ltd. (base de datos informatizada).

• *Remote Sensing of Natural Resources: A Quarterly Literature Review*. University of New Mexico, Technology Application Center, Alburquerque, NM 87131, USA.

• RESORS (*Remote Sensing Online Retrieval System*). Canada Center for Remote Sensing, Department of Energy, Mines and Resources, 588 Booth Street, CDN Ottawa, Ontario K1A 0Y7, Canadá.

7. Organismos dedicados a la distribución de imágenes

• *Earthwatch*, 1900 Pike Road, Longmont, Colorado 80501, USA.

• *EOSAT (Earth Observation Satellite Company)*, 4300 Forbes Boulevard, Lanham, MD 20706, USA (www.eosat.com). Representantes españoles: (a) Infocarto, Gobelas, 25 - 3°, 28023 Madrid; (b) Ibersat, Velázquez 24 - 5°, 28001 Madrid.

• *INTA - División Ciencias del Espacio* (representante español de la red europea EARTHNET), Carretera de Ajalvir, km. 4, 28850 Torrejón de Ardoz, España.

• *NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)*, NESDIS, World Weather Building, Room 100, Washington, D.C. 20233, USA. (www.ncdc.noaa.gov).

• *Radarsat International*, 3851 Shell Rd, Suite 200, CDN-Richmond, B.C. V6X 2W2, Canadá. (www.rsi.ca).

• *SOJUZKARTA*, 45 Volgogradski Pr., Moscow 109125, Rusia. (www.spotimage.fr).

• *SPOT-Image*, 5 rue des Satelites, Toulousse, B.P. 4359, F-31030, Francia. Representante español: Aurensa, San Francisco de Sales 38 - 1°, 28003 Madrid.

• *U.S.Geological Survey, EROS Data Center*, Sioux Falls, SD 57198, (edcwww.cr.vsgs.gov).

8. Empresas dedicadas a la fabricación de equipos de tratamiento digital de imágenes y S.I.G.

• DRAGON, Six University Drive Suite 213, Amherst, MA 01002, USA.

• ENVI, Research Systems Inc., 2995 Wilderness Place, Boulder, CO 80301, USA. Representante español: Estudio Atlas, Tomas Meabe 15, 28019 Madrid.

• ERDAS, 430 Tenth Street, N.W., Suite N206, Atlanta, GA 30318. Representante español: Infocarto, Gobelas, 25 - 3°, 28023 Madrid.

• ER-Mapper, 87 Colin Street, West Perth, Western Australia 6005. Representante español: Tragsatec. Avda. Ciudad de Barcelona, 118/124, 28007 Madrid, e Ibersat, Araquil, 11 - 28023 Madrid.

• ESRI, 380 New York St. Redlands CA92373, USA. Representante español: ESRI España, Princesa, 3 - 7 Planta, 28008 Madrid.

• Idrisi, Clark University, Clark Labs for Cartographic Technology and Geographic Analysis, 950 Main Street, Worcester MA 01610-1477, USA. (Centro de Recursos Idrisi).

• Ilwis, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC), P.O. Box 6, NL-7500 AA, Enschede, Holanda.

• Intergraph, One Madison Industrial Park, Mail Stop IW17 B6, Huntsville, Alabama 35894, USA.

• Laser Scan, Cambridge Science Park, Milton Road, Cambridge CB 4FY, Reino Unido.

• PCI, 50 Est Wilmot Stree, L4B 1M5 Richmond Hill, Canada, Representante español: ESPELSA, Acanto, 22, 10ª planta, 28045 Madrid.

• Terra-Mar, 1937 Landings Drive, Mountain View, CA 94043, USA.

• TNT, Micro-images Inc., 201 North 8th Street, Lincoln, NE 68508-1347, USA.

9. Direcciones de Internet útiles para acceder a información sobre teledetección

Fuentes de datos:

• Imágenes del radar de abertura sintética del SIR/C: www.jpl.nasa.gov/sir
• Imágenes europeas del AVHRR: netb@mail.esrin.esa.it
• Fotografías de satélites militares accesibles a usos civiles: edcwww.cr.usgs.gov/dclass/dclass.html

- Imágenes Landsat e IRS: www.eosat.com
- Imágenes del satélite DMSP: www.ngdc.noaa.gov
- Imágenes Meteosat: www.dkrz.de/sat/sat_eng.html; www.nexor.co.uk/users/jpo/weather/ weather.html
- Imágenes ATSR: www.atsr.rl.ac.uk
- Imágenes AVHRR: edcwww.cr.vsgs.gov/glis/hyper/guide/avhrr
- Imágenes de satélites japoneses: hdsn.eoc.nasda.go.jp
- Información diversa sobre imágenes: www-dial.ece.arizona.edu/OtherImagesites.html

Asociaciones profesionales:

- ASPRS: www.asprs.org
- SELPER: www.igeograf.unam.mx/selper.html (lista de discusión en majordomo@indiy2.igeograf.unam.mx)

APÉNDICE II: GLOSARIO[1]

ABERTURA: Se habla de apertura de un sistema óptico por la relación entre la luz que deja pasar un diafragma y la que obstruye. *APERTURE*

ABSORCIÓN ATMOSFÉRICA: Indica la eliminación que realiza la atmósfera de distintos tipos de energía, en razón de sus propios componentes, y principalmente del ozono, oxígeno atómico y vapor de agua. *ABSORPTION*

ACTIVO, SISTEMA: Se habla de sensores activos, cuando son capaces de emitir sus propias ondas electro-magnéticas, y grabar posteriormente el haz reflejado por el objeto bajo estudio. *ACTIVE SYSTEMS*

ALBEDO: Ver reflectividad.

ALETEO: Es la consecuencia de la rotación de una plataforma sobre su eje longitudinal. *ROLL*

ANOTACIONES: Diversos elementos gráficos que son incorporados al tratamiento de las imágenes para mejorar su legibilidad.

BANDA ESPECTRAL: Se refiere este término a una selección de longitudes de onda con comportamientos electro-magnéticos similares. *SPECTRAL BAND*

[1] Los términos se han extraído de distintos manuales de teledetección y diccionarios técnicos. Incluyen algunas modificaciones de los referenciados en la primera edición, considerando los términos que aportamos al "Diccionario de Cartografía" (editado por I. Otero en 1995, Madrid, Ediciones de Ciencias Sociales). Para una relación más detallada puede consultarse esta obra, así como el diccionario multilingüe de la SELPER, publicado en 1989.

BARRIDO MULTIESPECTRAL, Equipos de: Se trata de equipos sensores que permiten explorar secuencialmente la superficie de la Tierra, dividiendo la radiación captada en diversas bandas espectrales. *MULTISPECTRAL SCANNER*

BIT: Refiere a un dígito del sistema binario.

BYTE: Un grupo de ocho bits de datos numéricos.

CABECEO: Ocurre cuando una nave espacial se inclina a lo largo de su eje de vuelo. *PITCH*

CALIBRACIÓN: Proceso de comparar ciertas medidas específicas con otro instrumento estándar. *CALIBRATION*

CÁMARA MULTIBANDA: Cámara que expone diferentes áreas a un film, o a más de un film, a través de una lente. Incluye diferentes objetivos, cada uno de los cuales presenta diversos filtros o tipos de película, de tal forma que puede obtenerse la misma porción del terreno en diferentes bandas espectrales. *MULTIBAND CAMERA*

CÁMARA DE GRAN FORMATO: Se trata de un cámara que permite obtener negativos sobre dimensionados, 23 x 46 cm, en lugar de los estándar, 23 x 23 cm. Se ha utilizado en diversas misiones del *Space Shuttle*. *LARGE FORMAT CAMERA, LFC*

CAMPO INSTANTÁNEO DE VISIÓN: Este término expresa el ángulo exacto de visión que es detectado en cada pauta de observación en un sistema de exploración electrónica. Normalmente se mide en grados o micro-radianes y se relaciona con la superficie real abarcada por el detector. *INSTANTANEOUS FIELD OF VIEW, IFOV*

CATÓDICOS, Tubos de rayos: Un tubo en el vacío capaz de producir imágenes en Blanco y Negro o Color, mediante el choque de electrones sobre una superficie sensibilizada. *CATHODE RAY TUBE, CRT*

CINTAS COMPATIBLES CON ORDENADOR: Cintas magnéticas que contienen datos digitales. Aunque todavía constituyen el soporte más habitual de las imágenes de satélite, están siendo sustituidas paulatinamente por cartuchos o discos compactos. *COMPUTER COMPATIBLE TAPE, CCT*

CLASIFICACIÓN DIGITAL: Proceso por el que se asigna un pixel de una imagen multi-espectral a una de las categorías de la leyenda, generalmente sobre la base de similitudes entre los valores numéricos que las definen. *PATTERN RECOGNITION, DIGITAL CLASSIFICATION*

CLUSTER: Se habla de cluster o conglomerado cuando los píxeles o elementos de una imagen tienden a formar grupos con similares condiciones espectrales. El agrupamiento automático no supervisado pretende encontrar estos grupos espectrales idóneos como reflejo de los naturalmente existentes en la imagen.

COMPONENTES PRINCIPALES: Es una técnica de tratamiento estadístico que permite condensar una serie de variables en un menor número sobre la base de sus correlaciones mutuas. *PRINCIPAL COMPONENTS*

CONDUCCIÓN: La transferencia de energía electromagnética a través de un material por interacción molecular. *CONDUCTION*

CONTRASTE: Diferencia de valor o tono entre las áreas más claras y más oscuras de una imagen. *CONTRAST*

CORRECCIONES: Indican las operaciones digitales tendentes a eliminar errores en la adquisición de las imágenes, ya sean radiométricos o geométricos.

CUERPO NEGRO: Se trata de un emisor ideal, que radia el máximo de energía por unidad de superficie en cada longitud de onda y para un temperatura dada. Un cuerpo negro también absorbe toda la energía que sobre él incide. *BLACKBODY*

DATOS AUXILIARES: Medidas y observaciones acerca de los objetos, áreas o fenómenos que serán captados por algún medio de teledetección. Pueden ser mapas de ocupación del suelo, litología, análisis químicos, topografía, etc. *DATA REFERENCE*

DENSIDAD, Intervalos de: Indica el proceso de convertir el tono continuo de una imagen en un pequeño número de tonos de gris o color, cada uno de los cuales corresponde a un intervalo digital determinado por el usuario. *DENSITY SLICING*

DETECCIÓN DE CAMBIOS: Cualquier técnica que permita señalar sobre dos o más imágenes multitemporales aquellas zonas que han experimentado transformaciones. *CHANGE DETECTION*

DIGITIZACIÓN: El concepto refiere a cualquier conversión de un documento analógico en formato numérico. *DIGITIZING*

DISTORSIÓN PANORÁMICA: Se produce en los sistemas de barrido por un efecto de diferenciación de escala, en la línea perpendicular a la dirección de vuelo.

DOPPLER, Efecto: La variación en la frecuencia de una señal, debido al movimiento del transmisor. *DOPPLER SHIFT*

ELECTRO-MAGNÉTICA, Energía: Energía propagada a través del espacio o de otro medio material en un modelo armónico ondulatorio con un componente magnético y otro eléctrico. *ELECTRO-MAGNETIC ENERGY*

EMISIVIDAD: Proporción entre la energía emitida por un determinado objeto y la que emitiría un cuerpo negro a la misma temperatura. *EMISSIVITY*

ESCÁNER: Barredor óptico electrónico, que permite convertir un nivel de gris o color en un código numérico. *SCANNER.*

ESPECTRO ELECTRO-MAGNÉTICO: Se trata de la agrupación de la radiación electromagnética en distintas bandas, definidas por la longitud de onda o la frecuencia, que presentan un comportamiento radiométrico similar. *ELECTRO-MAGNETIC SPECTRUM*

ESTÉREO-RADIÁN: Unidad de medida del ángulo sólido. *STEREO-RADIAN*

FILTROS ATMOSFÉRICOS: Cualquier material que ya por absorción o por reflexión modifica selectivamente la radiación transmitida a través de la atmósfera. Los más destacados son el oxígeno, ozono, dióxido de carbono, monóxido de carbono y vapor de agua.

FILTROS DIGITALES: Se trata de matrices de coeficientes numéricos que permiten atenuar o acentuar —según su finalidad y estructura— las gradaciones radiométricas presentes en una imagen. *DIGITAL FILTERS*

FRECUENCIA: Número de ciclos por segundo que pasan por un punto fijo. *FREQUENCY*

GAUSIANA, Distribución: Término estadístico que refiere a la disposición de las frecuencias observadas en una variable como ajustadas a la curva normal. *GAUSSIAN DISTRIBUTION*

HISTOGRAMA: Una representación gráfica de las frecuencias observadas en una determinada imagen. *HISTOGRAM*

IMAGEN: Cualquier forma de representación pictórica de los datos no obtenida por medios fotográficos. *IMAGE*

INERCIA TÉRMICA: Es la medida de la respuesta de un material a los cambios de temperatura. *THERMAL INERTIA*

INFRARROJO: Porción del espectro comprendida entre 0,7 y 100 micras, que tiene gran importancia para estudios de teledetección. Normalmente suele dividirse

en infrarrojo cercano, medio y lejano. Este último también se conoce como infrarrojo térmico. *INFRARED*

INFRARROJO COLOR: Se trata de una composición coloreada en la cual se aplican a las bandas espectrales verde, roja e infrarrojo próximo, los colores naturales azul, verde y rojo, respectivamente. Resulta muy útil para detectar cambios en las condiciones de las superficies vegetales. *COLOR INFRARED*

IRS: Indian Resources Satellite, satélite indio de recursos naturales.

JERS: Japanese Earth Resources Satellite, satélite japonés de recursos naturales.

LAMBERTIANA, Superficie: Indica un perfecto difusor, que refleja la energía incidente, por igual, en todas las direcciones. *LAMBERTIAN*

LANDSAT: Serie de satélites construida por NASA dedicados específicamente a la detección de recursos naturales.

LÍDAR: Se trata de un sensor activo que trabaja con luz polarizada o láser.

LONGITUD DE ONDA: Es la medida de la distancia que separa dos valores culminantes entre sucesivas ondas. *WAVELENGTH*

MÁXIMA VEROSIMILITUD: Es un criterio estadístico de clasificación digital de imágenes, por el cual se asigna cada pixel de la imagen a la categoría para la cual posee mayor probabilidad de pertenencia. *MAXIMUM LIKELIHOOD*

MICRO-DENSITÓMETRO: Es un instrumento capaz de traducir un escala de grises a formato digital, mediante la medida de la densidad del film. *MICRO-DENSITOMETER*

MICRÓMETRO: Unidad de longitud empleada para medir longitudes de onda de alta frecuencia. Equivale a la millonésima parte de un metro. *MICROMETER*

MICRO-ONDAS: Porción del espectro electromagnético comprendida entre 1 mm y 1 m. *MICROWAVE*

MIE, Dispersión: Tipo de difusión atmosférica provocada por partículas con similares dimensiones a la longitud de onda de la radiación. *MIE SCATTERING*

MOS: Marine Observation Satellite, Satélite de recursos naturales diseñado por la agencia espacial japonesa (NASDA), con fines de investigación oceanográfica.

MOSAICOS: Se trata de un ensamblaje de distintas imágenes aéreas o espaciales que cubren parte, al menos, del mismo territorio.

NIVEL DIGITAL: Valor entero que traduce numéricamente la intensidad radiométrica recibida por un sensor óptico-electrónico. *DIGITAL NUMBER, PIXEL VALUE.*

ORIENTACIÓN ANGULAR: Menciona la orientación de un sistema de teledetección con respecto a una referencia geográfica. *ATTITUDE*

ORTO-FOTOGRAFÍA: Fotografía corregida de las distorsiones del relieve. *ORTOPHOTOGRAPHY*

PASIVO, Sistema: Un sistema sensor que detecta la radiación emitida desde el objetivo o reflejada por él. *PASIVE SYSTEMS*

PÍXEL: Derivado del inglés *«picture element»*. Es el elemento pictórico más pequeño de las imágenes que es susceptible de ser procesado.

PUNTOS DE CONTROL: Se trata de elementos geográficos que pueden ser localizados precisamente en una imagen y en un mapa para ser empleados en la corrección cartográfica de dicha imagen. *GROUND CONTROL POINT, GCP*

RADAR: Sistema activo de micro-ondas que emite un haz energético sobre la superficie terrestre para luego recoger su reflexión sobre ella. Existen dos tipos de radar: el lateral, y el de apertura sintética. *RADAR*

RADIACIÓN: El proceso en el que la energía electromagnética es propagada a través del espacio libre.

RADIANCIA: Total de energía radiada por unidad de área y por ángulo sólido de medida. *RADIANCE*

RADIÓMETRO DE MICRO-ONDAS: Es un instrumento para medir la energía radiada por las superficies con una longitud de onda de milímetros o centímetros. *MICROWAVE RADIOMETER*

RAYLEIGH, Dispersión: Se produce por partículas atmosféricas mucho más pequeñas en tamaño que la longitud de onda de la radiación. *RAYLEIGH SCATTERING*

REALCE DE IMÁGENES: Procesos digitales que tienen como fin mejorar la calidad visual de la imagen, mediante el aumento del contraste interno o la creación de nuevas bandas que ilustren mejor sobre sus características originales. *ENHANCEMENT*

REALCE DE BORDES: Proceso particular de realce que tiene como objetivo enfatizar las áreas de transición en una imagen. *EDGE ENHANCEMENT*

REFLECTIVIDAD: Porcentaje de radiación incidente que es reflejada por una superficie bidimensional. *REFLECTANCE*

RESOLUCIÓN: La resolución es la medida de la habilidad de un sistema sensor para discriminar información dentro de la imagen. Refiere al tamaño de la mínima unidad de información en el terreno (espacial), al número de bandas disponibles (espectral), a los niveles de codificación (radiométrica) o a la frecuencia de cobertura (temporal). *RESOLUTION*

RUIDOS ATMOSFÉRICOS: Refiere este término a las interferencias imprevistas y más o menos aleatorias que introducen una degradación en los datos originales. *ATMOSPHERIC NOISE*

RUIDO DE LA ESCENA: Concepto que refiere a la variabilidad espectral hallada en el interior de las distintas clases temáticas. *SCENE NOISE*

SENSOR: Cualquier instrumento que detecta energía electromagnética, la convierte en una señal y la presenta en forma susceptible de ser aprovechada para su estudio.

SIGNATURA ESPECTRAL: Forma peculiar de reflejar o emitir energía de un determinado objeto o cubierta. Está afectadas por las características físicas o químicas del objeto que interaccionan con la energía electro-magnética, y varía según las longitudes de onda. *SPECTRAL SIGNATURE*

SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA: Conjunto de programas que permiten almacenar, recuperar, modificar y combinar cualquier tipo de variables georeferenciadas. *GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS*

SUAVIZADO DE IMÁGENES: Operación digital que tiene por objeto obtener una mayor generalización en los resultados.

TELEDETECCIÓN: Es la técnica que permite obtener información sobre un objeto, área o fenómeno a través del análisis de los datos adquiridos por un instrumento que no está en contacto con el objeto, área o fenómeno bajo investigación. *REMOTE SENSING*

TERMOGRAFÍA: La termografía es la rama de la teledetección que se ocupa de la medición de la temperatura radiada por los fenómenos de la superficie de la Tierra desde una cierta distancia. *THERMOGRAPHY*

TESELAR, Estructura: Sistema de almacenamiento de datos en un SIG que parte de dividir el terreno en una serie de celdillas regulares, sobre las que se codifican las distintas variables que integran el sistema. *GRID-Based GIS*

THEMATIC MAPPER: Se trata de un equipo de barrido multiespectral bastante sofisticado, que se incorpora a los satélites de recursos naturales Landsat-4 y 5.

VECTORIAL, Estructura: Forma de almacenamiento de datos en un SIG, en el cual las distintas unidades temáticas se definen por las coordenadas de sus bordes. Una descripción topológica asociada a esa información gráfica permite reconstruir, posteriormente, las variables temáticas asociadas a esos polígonos. *VECTOR-Based GIS*

VENTANAS ATMOSFÉRICAS: Aquellas porciones del espectro en las cuales la atmósfera ofrece poca atenuación a la radiación electro-magnética. *ATMOSPHERIC WINDOW*

VERDAD TERRENO: Refiere a todas las medidas de magnitudes físicas y muestreos llevados a cabo sobre el área materia de operación. *GROUND TRUTH*

VIDICON, Sistema: Es un tubo electrónico sensor de imágenes en el cual la imagen es recibida y alimentada sobre la superficie de un fotoconductor que sostiene el barrido electrónico. *RETURN BEAM VIDICON*

VISUALIZACIÓN DE DATOS: Cualquier representación visual de imágenes digitales. Puede realizarse sobre un monitor de rayos catódicos, un plotter electrostático, plotter de láser o impresora de líneas. *DISPLAY*

APÉNDICE III: ÍNDICE TEMÁTICO

Este libro, publicado por Ediciones Rialp, S. A., Alcalá, 290, 28027 Madrid, se terminó de imprimir en Anzos, S. L., Fuenlabrada (Madrid), el día 8 de noviembre de 1996.